



# Logros y errores en Ingeniería y la educación del Ingeniero

## AUTORES

Alberto Bernardini-Arturo Bignoli, Alfredo Calvelo, Alberto E. Cassano,  
Eduardo Núñez, José Luis Otegui, Horacio C. Reggini, Luis A. de Vedia-Carlos Lerch

## PUBLICADO POR



**ANCEFN**

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

# Logros y errores en Ingeniería y la educación del Ingeniero

---

## AUTORES

Alberto Bernardini-Arturo Bignoli, Alfredo Calvelo, Alberto E. Cassano,  
Eduardo Núñez, José Luis Otegui, Horacio C. Regini, Luis A. de Vedia-Carlos Lerch

---

## PUBLICADO POR

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales [ANCEFN]



SERIE: PUBLICACIONES CIENTÍFICAS N° 7 (2015)

Logros y errores en ingeniería y la educación del ingeniero /  
Luis A. de Vedia ... [et.al.]. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : ANCEFN -  
Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2015.  
93 p.: il.; 26 × 18 cm.

ISBN 978-987-96759-9-1

1. Ingeniería. 2. Educación Superior. I. de Vedia, Luis A.  
CDD 620.007

Fecha de catalogación: 18/03/2015

Esta publicación es propiedad de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

ISBN 978-987-96759-9-1

Primera edición, Buenos Aires, marzo 2015, 200 ejemplares.

Copyright © by Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Toda la correspondencia referida a esta publicación debe dirigirse a:

*All enquires regarding this publication should be addressed to:*

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Av. Alvear 1711, 4º piso, (1014) Buenos Aires.

E-mail: [biblio@ancefn.org.ar](mailto:biblio@ancefn.org.ar)

Sitio web: [www.ancefn.org.ar](http://www.ancefn.org.ar)

Queda hecho el depósito previsto por la Ley 11.723

Todos los derechos reservados.

Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio electrónico o mecánico, incluyendo fotocopiado, grabación o cualquier otro sistema de archivo y recuperación de información, sin el previo permiso por escrito de la Academia.

## ÍNDICE

Palabras preliminares.....	1
Alberto E. Cassano, “Las atracciones de la ingeniería química. Una profesión que reclama por todo”.....	5
Alfredo Calvelo, “Interacciones entre ciencia e industria para el desarrollo de productos” .....	43
José Luis Otegui “Fallas en cañerías de gas y petróleo: La experiencia argentina”.....	57
Luis A. de Vedia, Carlos Lerch, “Errores en ingeniería ¿Qué aprendemos de ellos? ”.....	71
Horacio C. Reggini, “El papel del error en la búsqueda del saber”.....	81
Alberto Bernardini, Arturo J. Bignoli. “¿Qué es la ingeniería estructural?” .....	85
Eduardo Núñez. “La matemática en la enseñanza de la Ingeniería Civil” .....	93



## **LOGROS Y ERRORES EN INGENIERIA Y LA EDUCACION DEL INGENIERO**

### **Palabras preliminares**

La presente es la segunda publicación de una serie anual y tuvo su origen en una inquietud surgida en el seno de la Sección Ingeniería de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la República Argentina. Esta propuesta se basa en la importancia del rol del ingeniero en el desarrollo de una sociedad moderna, y la relevancia que sobre la forma de ejercer ese rol tiene no sólo la competencia técnica sino también la educación del profesional de la ingeniería. Esta educación debe brindar las capacidades para entender un mundo en rápido cambio tecnológico y para contribuir positivamente a ese cambio, lo que implica en última instancia, el mejoramiento integral de la calidad de vida de los seres humanos.

Las siete contribuciones que integran la presente publicación, corresponden a casos o reflexiones individuales, por lo tanto diversos, que describen experiencias personales o corporativas que tienen que ver con logros alcanzados en el campo de la ingeniería, pero también en algunos casos con errores cometidos o metas incumplidas. Una idea central que corre como un hilo conductor a través de la mayoría de los trabajos, es la convicción que ingeniería es mucho más que ciencia aplicada, por lo que se procura llevar este mensaje a quienes se inician en esta disciplina o tienen contemplado hacerlo en un futuro próximo. Aún cuando éste es el objetivo fundamental de esta publicación, se confía en que su contenido pueda ser también atractivo y de utilidad a profesionales maduros.

La serie de contribuciones se abre con un trabajo, desafortunadamente póstumo, de gran valor histórico y testimonial. Es el relato personal que el Dr. Alberto Cassano nos hace de las circunstancias que ocuparon una etapa importante de su vida y que tuvieron un fuerte impacto en el desarrollo tecnológico de nuestro país.

Le sigue a este trabajo otro testimonio personal. Es el del Ing. Alfredo Calvelo que nos describe las interacciones entre ciencia e industria en un campo muy particular como lo es el desarrollo de productos alimenticios.

El Ing. José Luis Otegui nos relata a continuación las condiciones que han llevado a las fallas de tuberías enterradas en la Argentina, empleadas para el transporte de gas y petróleo.

Con vinculación a este tema, el trabajo de los Ings. Luis de Vedia y Carlos Lerch nos relata casos paradigmáticos de errores en ingeniería y procura sacar conclusiones sobre el valor pedagógico que su análisis puede tener en la formación de los nuevos ingenieros.

Complementado el trabajo anterior, el Ing. Horacio Reggini efectúa reflexiones sobre el papel del error en la búsqueda del saber y su potencial valor formativo.

Con un tono marcadamente técnico, el trabajo de los Ings. Alberto Bernardini y Arturo Bignoli nos ilustra sobre la incertidumbre que inevitablemente se encuentra presente en todo proyecto de ingeniería ilustrando este concepto con un ejemplo particular de la ingeniería estructural. En este análisis, los autores hacen uso de la lógica borrosa no booleana destinado esencialmente a los iniciados en este tema.

Finalmente, la publicación se cierra con unas reflexiones del Ing. Eduardo Núñez sobre la importancia de la matemática en la enseñanza de la ingeniería civil.

En resumen, el camino que transita esta obra es variado y no carente de terreno áspero. Representa el mejor saber y entender de quienes han contribuido a la misma con la convicción de hacer un aporte útil a la profesión de ingeniería.

**Luis A. de Vedia**  
Instituto de Tecnología (UNSAM-CNEA)  
Facultad de Ingeniería (UBA)



## **PREFACIO AL TRABAJO DEL DR. ALBERTO CASSANO**

El Dr. Alberto Cassano describe en este capítulo uno de los logros más significativos de la Ingeniería Química en el país, consistente en el desarrollo de la ingeniería básica de una planta modelo experimental de agua pesada. Esta apasionante tarea fue llevada a cabo contra viento y marea por un grupo de jóvenes investigadores liderados por los Doctores Alberto Cassano y Ramón Cerro, en un contexto de prohibición de acceso a la información científica y tecnológica necesaria. El trabajo describe los diversos escollos que debieron ser superados, con un interesante final que no se comenta aquí para que sea descubierto en su lectura. Pero además, el capítulo sirve para ilustrar los contenidos de la ingeniería química en acción, con el propósito de despertar vocaciones potenciales para su estudio.

El Dr. Cassano tuvo enormes logros como investigador científico, particularmente en el área de los reactores fotoquímicos. Pero siempre tuvo un recuerdo imborrable por su osada aventura juvenil en el diseño de la planta de agua pesada. Cuando la Academia le solicitó la redacción de este capítulo, el Dr. Cassano se encontraba con serios problemas de salud. No obstante, asumió con alegría el compromiso y cumplió con su palabra. Lamentablemente, el Dr. Cassano falleció antes de enviar su escrito. Su señora esposa, María Silvana Wagner, se encargó de compilar y adaptar el texto al estilo requerido, trabajo del que estamos plenamente agradecidos. De modo que el capítulo que sigue es el último de su gran listado de trabajos científicos y de divulgación pero, seguramente, uno de los más ligados a sus recuerdos más entrañables.

**Dr. Roberto J. J. Williams**



## **LAS ATRACCIONES DE LA INGENIERÍA QUÍMICA UNA PROFESIÓN QUE RECLAMA POR TODO**

*Alberto E. Cassano*

INTEC (Universidad Nacional del Litoral y CONICET)  
CCT CONICET Santa Fe. Edificio INTEC I  
Colectora de la Ruta Nacional No. 168  
acassano@intec.unl.edu.ar

### **Resumen**

Es una tarea difícil para un adolescente tomar la decisión relacionada con su vocación. Finaliza la enseñanza secundaria sin que le haya quedado claro qué significan los contenidos de cada una de las disciplinas que estudió y el mercado de universidades le ofrece tests usualmente carentes de definiciones precisas que contribuyen a crearle más confusiones.

En un esfuerzo por ayudarlo a entender lo que significa una profesión, junto a la advertencia de evitar caer en el error de tomar como referencia primordial la ayuda que, sin las adecuadas interpretaciones y exégesis, le ofrecen las propuestas que hay en la WEB, se plantea en este trabajo, qué es lo que puede encontrar en una determinada profesión en términos de contenidos, desafíos, atractivos y complejidades asociadas con el ejercicio de sus funciones, incluyendo entre ellas la necesidad de no confundir las facilidades que había encontrado antes en el colegio, con las aptitudes temáticas que el ejercicio profesional le va a plantear.

Con este propósito se ha tomado un trabajo que representó, dentro de las tareas que debe ejecutar un ingeniero químico, un reto que llamó a un grupo de nosotros, para hacer el diseño de una Planta de Agua Pesada, en un momento en que, como resultado de conflictos internacionales, todos los países poseedores de la información científico-técnica para hacer la labor cerraron las puertas de acceso a ella.

Así, se relata cómo se iniciaron para satisfacer la apuesta que la profesión a la que los llevó su vocación los enfrentó.

*Palabras clave: profesión, vocación, aptitudes, diseño, Agua Pesada.*

### **CHEMICAL ENGINEERING ATTRACTIONS A profession that claims for everything**

#### **Abstract**

It is a difficult task for adolescents to make, at proper time, the decision that will satisfy their vocation. They finish high school without having a clear significance of the disciplines they had studied. Meanwhile, the university market is offering them tests lacking precise definitions that would contribute to avoid creating even more confusion.

In an effort to help them to understand what may be the meaning of a profession, along with the warning of avoiding to fall in the error of taking as references, without the adequate characterization, the proposals that exist on the WEB on the subject, in this work, it is presented what they can find in a specific profession in terms of contents, challenges, attractions and complexities associated with the exercise of their functions, including among them, the lack of confusing the simplicity that they had earlier throughout high school, with the thematic aptitudes that the professional demand is going to urge on them.

With this intention it has been chosen a work that represents, within the tasks that a chemical engineer may be called to execute, a challenge that was presented to a group of them, consisting in the design of a Heavy Water Plant, in a moment in which, from international conflicts, all the countries holders of the scientific and technical information to do the work, closed the accessing doors to it.

This work shows how they managed to meet the commitments resulting from the profession they had chosen and led them to overcome all those difficulties.

*Key words: Profession, vocation, aptitudes, design, Heavy Water.*

## **Prólogo**

La Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales nos ha solicitado contribuir a visualizar campos del conocimiento para facilitar el acto de indagaciones vocacionales, planteando aspectos específicos de nuestra profesión. En mi caso me correspondió la Ingeniería Química. Lo he interpretado como que a mi gusto y desde mi forma de ver, transmita lo que significa el vivir trabajando en esa área del conocimiento. Y, con mis propias experiencias, he pensado que ello es bastante más que contar lo que es la referida área científico tecnológica de estudios y ajetrearse en ella, porque en la realidad diaria, todo va a ocurrir dentro de un contexto que involucra el qué, el dónde, el cuándo, el porqué, el para qué y muchas otras referencias en un entorno y trama tan complejo como agradable; tal vez más que la disciplina per sé.

El ejercicio profesional no es solamente el aplicar los conocimientos adquiridos o crear los que pudieren estar ausentes. Puede significar tener que intervenir en conflictos institucionales, dificultades de índole política, hacer aportes en el caso de plantearse enfrentamientos de naturaleza internacional o asistir con lo que se sabe, si aparecen conflictos entre entidades, como pueden ser otras empresas productivas. Y en todos los casos, en la medida que nuestra profesión sea llamada a hacer las asistencias que le puedan ser requeridas, eso forma también parte de las responsabilidades asociadas a las tareas que le corresponde asumir. De allí que la ejercitación de la vasta “vocación” de una carrera abarca un campo de trabajo de gran amplitud, superando lo que parecieran definir muy sencillamente en este caso dos palabras sueltas. Y la mayor parte de los procedimientos de indagación de las áreas de búsqueda relacionados con el acto de elección, no los contemplan.

Se entenderá mejor este prólogo si se anuncia desde el principio que nosotros teníamos que participar de un proyecto relacionado con la energía nuclear; y dentro de ellos trabajar en una de las cuatro o cinco áreas más sensitivas desde el punto de vista de los efectos que su nombre genera en la sociedad: la producción de agua pesada para los reactores nucleares productores de energía, en un contrato con la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Era una de las líneas de trabajo privilegiadas elegidas para el Plan Nuclear 1975-1985 y sus extensiones, por la República Argentina. ¿Por qué generaba problemas? Porque como cualquiera se puede imaginar, su uso también podría haber estado orientado a objetivos mucho menos aceptables relacionados con la industria bélica.

Agua pesada ha sido siempre una fuente de posibles conflictos de idiosincrasia institucional con la International Atomic Energy Agency (IAEA) directamente relacionada con las Naciones Unidas; de dificultades adicionales de rasgos específicamente políticos porque se ejecutó durante una gran parte de la labor (1975-1983), mientras la Argentina atravesaba por su conflicto interno denominado “Proceso”, que era una fuente de inconvenientes y escollos, tan sólo considerando algo tan sencillo como la selección de personal con la intervención de la exSIDE (Servicio de Inteligencia del Estado); de eventuales conflictos con los países del Nuclear Suppliers Group (o denominado de manera más común, Club de Londres, formado por países con empresas proveedoras de insumos nucleares que se los negaban a los países que no habían adherido a las exigencias de los poseedores de dichas tecnologías) por la existente negativa de la Argentina a las exigencias y en consecuencia el rechazo a las prohibiciones del Nuclear Non-Proliferation Treaty (Tratado de No Proliferación Nuclear) o, finalmente, con la adquisición de materiales y equipos provenientes de empresas de países pertenecientes a las distintas organizaciones que sí, en cambio, habían adherido a ella y otras equivalentes. Aunque la verdad demostró que la actitud tiene más de una cara, en principio lo primero que se recibía en un intento de negociación, era una negativa.

Por lo tanto el proyecto no sólo involucraba, entre otras cosas, calcular comportamientos químicos, modelar aspectos energéticos, diseñar equipos, considerar los aspectos económicos

y convivir con un problema científico-tecnológico complejo, sino que también nos obligaba a interactuar con el mundo real en que estaba profundamente sumergido.

En este espacio de trabajo, se plantearán las relaciones que existen entre los intereses, los gustos, las aptitudes, el ambiente laboral y muchos otros aspectos más, para poder adherir vocacionalmente a una profesión determinada, como en este caso la Ingeniería Química. A ello contribuyó un grupo de personas que cuando comenzamos nuestra tarea, en promedio, teníamos una edad de 24/5 años. A ellos les agradezco la posibilidad de escribir este trabajo.

## INTRODUCCIÓN

### **La decisión vocacional: Dudas y temores en la adolescencia**

Hay un período a lo largo de un proceso que es una mezcla de transformaciones en los seres humanos mientras transitan el mundo que va desde la niñez a la adultez. A gusto y especificidad del que lo analiza, lo denominan adolescencia, pubescencia, pubertad, y de otras formas. Las mismas involucran cambios anatómicos, fisiológicos, psicológicos y muchos otros más, que generalmente producen como mínimo preocupaciones en los padres, los amigos y por supuesto el sujeto que las padece. Son muchas, que sin ninguna vacilación generan en todos ellos en mayor o menor medida, dudas y temores. Entre ellas hay una que florece en el momento en que la persona llega al punto de preguntarse qué va a hacer de su vida. No es un aspecto natural bien definido y las ayudas externas no son siempre muchas o de gran valor. Y allí, todos los consejos -más o menos profesionales- atraviesan por el convencimiento de que se está hablando de un cambio importante que sin ninguna duda afectará el futuro estado social del involucrado. Su importancia cae en la categoría de las preocupaciones que a veces toman la forma de rompecabezas ver Fig. 1.

Es el punto en que se discuten fundamentalmente cuatro grandes rutas, con variadas opciones y opiniones: La primera es “tengo ganas de conseguir un buen trabajo que me garantice un buen ingreso”.

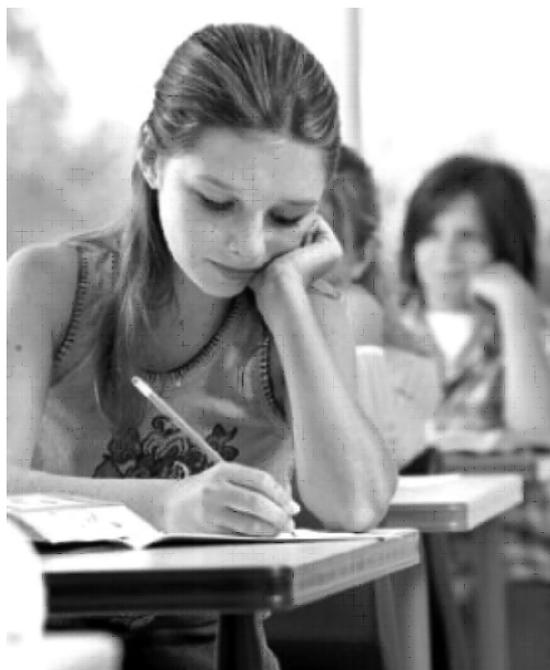


Figura 1. Decisión Vocacional

Hoy la sociedad muestra, a dicha función, como muy atractiva y la gente que la eligió con inteligencia goza de un muy buen pasar. “Los que están transitando ese tramo de la ruta, muestran lo exitoso que resultan ciertas faenas, sin que para ello se haya tenido que proseguir mucho más con los estudios”. “Si elijo bien el camino, mi bienestar económico es seguro; necesito eso y que, al menos, me guste un poco lo que voy a hacer”. La segunda es decidir que todavía no “me ha llegado el momento de dejar de depender de mis padres en los próximos pocos años”, sin que para ello sea necesario ir a la universidad (“o hacerlo pero con un bajísimo grado de dedicación, porque en realidad no es lo que más me interesa”). Lo importante es disfrutar de algunos de estos años sin asumir grandes responsabilidades. Esto resulta en una exagerada proporción de jóvenes que malgastan su tiempo mucho más de lo razonable y hace que muchos suframos (aunque no se percaten) cuando los vemos de ese modo. Se los categoriza como que son los que no trabajan (o no consiguen trabajo y son mucho menos responsables) o no estudian. La tercera es “buscar el trabajo que sea, con tal de ayudar a mi familia y dejar de ser una carga para ella”. Mientras el país no entienda que es fundamental crear un sistema que permita a estudiantes egresados o prontos a terminar, que son buenos (demostrado o demostrable), estudiar en la universidad y cubrir la falencia que representa para el entorno doméstico, el aporte económico que podría hacer su esfuerzo laboral, el problema permanece como una gran injusticia. El Estado mantiene esta deuda social desde hace muchísimos años. Claro está, que lo debería hacer de acuerdo a un proyecto de expansión en aquellas tareas universitarias que, con más necesidad, deben dar sus aportes para que el país se desarrolle.

Hacerlo en otras podría significar un malgasto de los recursos. Habrá que saber encontrar los equilibrios necesarios. Y finalmente, “yo elijo ir a la universidad” (a lo que agregó: tomada en serio). Si la universidad mejora (porque necesita hacerlo y mucho) es el camino más adecuado para los jóvenes que buscan su progreso personal y en muchos casos colaborar con el del país (Fig. 2).

Los tránsitos por los caminos que reclama el desarrollo del país en las carreras universitarias que con más certeza contribuyan a su crecimiento social, que van desde el industrial derivado de todas sus riquezas terrestres externas o profundas al cultural y económico (siempre que el mismo aporte al progreso de todas las clases sociales, sin continuar manteniendo el desequilibrio que persiste en la distribución de sus resultados), constituyen las grandes dudas al tomar una decisión, de acuerdo a sus valores personales, sus gustos y sin dejar de negar los esfuerzos que cada vía crea.

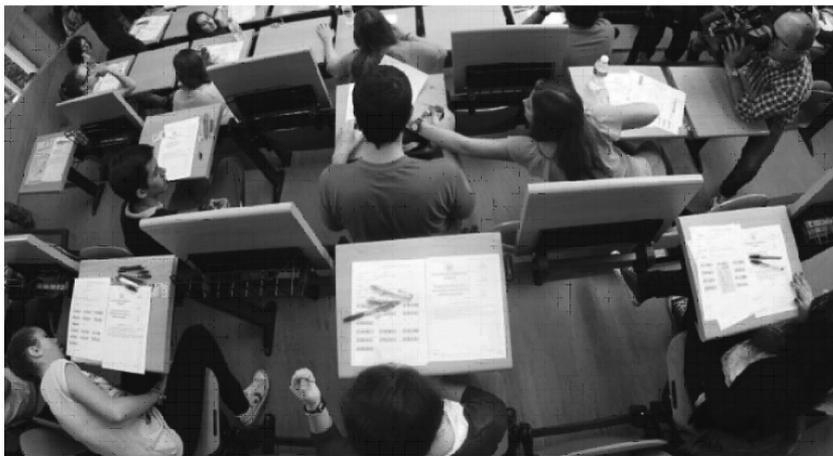


Figura 2. Yo elijo ir a la Universidad

En cierta medida esta introducción tal vez justifique una gran parte del resto del trabajo, o al menos mi visión del tema cuando decidí encararlo.

Cuando el sujeto con la ayuda de padres, amigos, las organizaciones que cumplen bien con sus funciones de promoción y sus propias opiniones, haya elegido por la cuarta, es el momento en que más nítidamente aparece el problema de las **vocaciones**. Y se trata de un tema muy complejo. Los adolescentes -recién dejando la niñez- están en el momento de empezar a pensar en las eventuales alternativas del cuarto camino -porque las demás por variados motivos han sido ya desechadas-, no tienen una clara idea de lo que han venido tratando de entender a veces bien, regular o mal, que se les ha estado queriendo transmitir en los años anteriores.

## **Las vocaciones**

La vocación suele en forma muy general, y a veces algo ambigua, ser relacionada con una dada inclinación hacia una forma especial de vida entre las que se encuentra, la que implica el desarrollo de una profesión. En algunos casos se la correlaciona muy simplemente con los “gustos, intereses y cualidades” de una persona y, de una manera basta y extensa es real, pero para nada suficientemente completa para asociarla con aquello que, adecuadamente, va a definirle lo que va a terminar satisfaciendo la totalidad de las expectativas del que busca compaginar sus aspiraciones con lo que el contexto de la vida que lo rodea le podrá brindar. En realidad si se atiende al origen del vocablo (del latín *vocatio* o *vocāre*) es un “llamado” que como tal estaría, en este aspecto, muy ligado a las inclinaciones sacerdotales. Aquí, la persona se hallaría respondiendo a un llamado divino y todo quedaría más esclarecido y fuera de dudas.

De cualquier manera, en general, en los hechos, se emplean términos tan amplios para definirla que hacen que los jóvenes recurran a la selección de cualquiera de los tres sustantivos antes mencionados y/o algunos otros más para establecer la definición más apropiada que piensan que más se adapta a las que creen que es lo que ellos poseen cuando se miran a sí mismos. Así por ejemplo, el adolescente que está por hacer una elección, puede pensar -tomando como referencia las tres anteriores caracterizaciones- que dado que su experiencia personal le ha demostrado ser rápido con las matemáticas, debería optar por dirigir su elección a algo relacionado con dicha “cualidad” y busca el tema o la disciplina que más requiera del uso de dicha aptitud y que además, de alguna manera, le haya gustado. En los hechos puede terminar siendo un matemático o un físico frustrado por citar dos profesiones poco elegidas.

La vocación depende de muchos sustantivos asociados con los gustos los intereses y las cualidades, con lo que no se la puede englobar en palabras tan vastas. A modo de ejemplo muy concreto, de qué vale ser rápido con las matemáticas si alguien que posee ambiciones carece de creatividad. O de qué sirve que nos pueda gustar el ejercicio de la cardiología médica, si no se nos ha advertido que debe venir acompañada de la ausencia del temor o el desagrado por las emergencias, con lo que el ejercicio responsable de su vocación se convierte en una autocondena con las respuestas a las llamadas telefónicas.

Una vez me preguntaron qué aptitudes buscaba en la selección de un becario para trabajar conmigo en una tesis doctoral. Mi respuesta, casi en tono de broma pero muy cerca de la realidad fue “tener mucha suerte”. En términos reales, y en otro nivel, podemos encontrarnos con un bachiller que tenga un promedio cercano a diez, lo que puede vincularse con inteligencia y dedicación, pero ocurre que después cuando debe trabajar en algún equipo o instrumento, en cualquier disciplina, en algún laboratorio o sala de máquinas por ejemplo, por falta de aptitudes prácticas, casi todo lo que toca, con frecuencia se le rompa.

## **La búsqueda de un futuro atractivo que no niegue la diversión**

Cuando hablamos de vocaciones, y en especial si se nos pide un consejo durante el proceso de búsqueda de una carrera universitaria, es imprescindible señalar que se trata de un tema de extrema complejidad. Al solo efecto de que sirva de advertencia, me valdré de información procedente de un conjunto de universidades que hacen aparecer en la WEB para elegir carreras, información aparentemente muy completa sobre caminos para encontrar vocaciones. No hay dudas de que tienen un claro propósito de reclutar alumnos y les proveen además de información característica sobre muchas de ellas como instituciones, les acompañan un conjunto de tests que se consideran vocacionales, que aparecen como muy extensos y completos y, en realidad no poseen la necesaria univocidad como para ser muy útiles o portadores de ajustadas tipicidades y distinciones, que no estén acompañadas de la posibilidad de grandes riesgos. Pueden proveer una cierta ayuda, pero con sus tests nadie debería tomar sus decisiones definitivas. La especificidad bien organizada está, en general, totalmente ausente y sin la ayuda de una guía bien formada y eminentemente ilustrada en caracterizaciones e informaciones altamente distintivas, y con los deseos de dedicarle tiempo al interesado, constituyen una fuente de inseguridades, desaciertos y fallas. En ocasiones se llegan a plantear las posibilidades en muy pocas grandes áreas (una de ellas por ejemplo, todas las ingenierías). Dentro de cada una de ellas, se suele sugerir para la decisión final, un cuestionario de un número muy variable de preguntas, que son comunes a todas las carreras de cada área. En Ingeniería el cuestionario consta de varias preguntas, entre las que están mezcladas, en un número demasiado reducido de consultas para este objetivo, interrogantes sobre gustos acerca de casi todas las posibles especialidades que uno pueda concebir. Claramente, el resultado no puede arrojar una salida suficientemente específica, en lo que hace a una orientación concreta y definida; es decir alejada de posibles errores y ciertamente, en cambio, rodeada de incertidumbres. No se puede asegurar que sean inútiles o engañosas; si se puede decir que el resultado no provee datos que sean mayormente nítidos y transparentes como para emitir un juicio en la elección con características suficientemente fiables. No se puede negar que existan diferentes calidades de propuestas y muchas que desconozco, las que posiblemente puedan ofrecer mayores garantías.

En ocasiones aparecen “tests” que con un objetivo equivalente, tienen, sorprendentemente, características muy diferentes. Por ejemplo: (a) Juzgar actividades diferentes sobre la base de la adjudicación de niveles de preferencias personales, (b) intereses universitarios, que están agrupados en un conjunto de enunciados que van abriendo puertas de elección, (c) búsqueda de preferencias entre las diferentes posibilidades vocacionales, que agregan entre las diferentes variedades opcionales, el trabajo profesional, la investigación, el desarrollo o la apertura a terrenos de especiales contenidos culturales, (d) Test de autoevaluación de cualidades e intereses, etc.

En todos sin embargo, sin la adecuada orientación personal de un experto, todo lo que obtiene el adolescente como respuesta final, es frecuentemente un conjunto de dudas e incógnitas que, en muchos casos sólo comienza a entender uno o dos años después de haber ingresado a la Facultad o Escuela Universitaria donde está feliz o desventuradamente frustrado, cursando su carrera.

Y lo que debe buscar con seguridad es algo que, junto a la realización del trabajo que lo ha llevado su búsqueda vocacional, lo exima de llevar una vida laboral donde esté ausente el placer y hasta cierto punto, la diversión.

El objetivo que persigo con esta contribución es señalarle al joven que busque compatibilizar lo que puede, lo que le gusta, lo que le ofrece el “mercado” de universidades y lo que le resultará alcanzable con sus potenciales. Lo que aparece en los tests vocacionales es tan sólo una parte de la labor profesional. Para ello recurriré a una visión de lo que es una

carrera universitaria muy específica, dándole la información más próxima a los detalles más distintivos que la caracterizan, en sus peculiares variables, durante el ejercicio laboral. Sabrá lo que puede hallar y lo que no está, incluyendo los contenidos disciplinares, pero sólo como un aspecto más de todo lo que en realidad le plantea como tareas funcionales a cumplir que son tanto o más importantes y que le podrán brindar satisfacciones o malogros y desengaños.

En mi caso, les escribiré acerca de la Ingeniería Química, conjugando los aspectos generales de la especialidad, con un ejemplo muy específico de su uso, en el desarrollo de un proyecto de especial envergadura y alto grado de dificultad, que al menos les brindará detalles reales de las singularidades propias de sus contenidos, los conflictos, escollos y aprietos que puede ofrecer, así como las posibilidades que brinda si se toman las cosas con seriedad y se vive continuamente la realidad, haciendo un ejercicio sistemático del contacto con los conocimientos más profundos y, mientras practica la aplicaciones de lo que aprendió, divertirse al hacerlo. En otras palabras, el que conoce la teoría profundamente, puede resolver cualquier nuevo problema que se le presente y, al mismo tiempo, notar que el deleite profesional está asociado al manejo preciso de esa teoría bien aprendida. Cualquiera que sea el camino elegido para llegar a la resolución del inconveniente o la contrariedad, el obstáculo o el apuro, su vocación le brindará muy a menudo satisfacciones inesperadas.

## EL PLANTEO DE UN CONTEXTO HISTÓRICO PREVIO

El relato que me va permitir hacer un planteo realista del ejercicio profesional y todas las variantes en el escenario y la trama en que se desarrolla un proyecto (que en este caso es algo muy especial) exige conocer la situación histórica y política que hay en todo su entorno, no sólo en lo que hace al país, sino también en algunos casos la situación extraña a la Argentina. Ello implica por cierto, entender también la evolución del comitente interesado en el proyecto, el proceso de desarrollo y el progreso del grupo que tuvo a su cargo la ejecución así como la de los organismos que contribuyeron a su financiamiento.

### Una breve historia

Lamentablemente es imposible hablar de nuestro proyecto sin que invariablemente aparezca un tema que es inevitable y a la vez, en los hechos reales, curiosamente, casi innecesario: A consecuencia de lo citado en el prólogo, se trata de la bomba atómica como muestra la Fig. 3. Nuestra tarea estuvo asociada con la producción de energía nuclear para fines pacíficos con el empleo del uranio **no enriquecido**, lo que representa menor eficiencia que el que usa la mayor parte de los países desarrollados y que se denomina, en cambio, uranio **enriquecido**. Hasta el año 1983 la Argentina no dominaba el proceso de enriquecimiento y, en realidad, el desarrollado en medio de una extrema confidencialidad y reserva es un logro muy útil, pero ha sido superado en el tiempo en las facilidades de operación y rendimientos por tecnologías más avanzadas.

El proceso con uranio (enriquecido o no) requiere además de muchos otros elementos no nucleares para poder generar energía, entre ellos por ejemplo para citar uno, el zirconio, que debido a su eficiencia se aplica en muchos otros de los reactores nucleares para mejorar su productividad, aunque se emplee uranio mucho menos pobre. Sin embargo nadie escucha hablar de él con la misma intensidad en que se ha hecho aparecer la palabra agua pesada, que es el líquido refrigerante y moderador en el control del flujo de neutrones que se producen en el interior de las barras combustibles, inevitablemente recubiertas de zirconio en los citados reactores. En aquel entorno histórico, cualquier proyecto argentino en el área nuclear hacía aparecer la palabra como ponderable o como condenable según quién fuera que la empleara en: (A) un círculo favorable al desarrollo nuclear local o (B) uno opuesto al progreso tecnológico

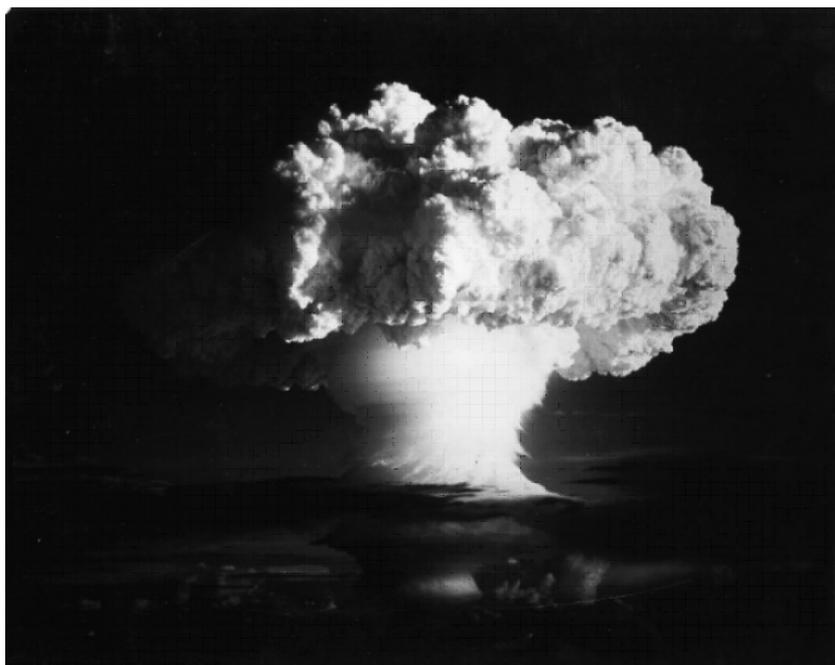


Figura 3. Bomba Atómica

en dicha dirección. Y nunca faltaba la forma más simple de denigrarla, vinculándola con un supuesto e imaginario proceso de armamento nuclear, aun en el caso de que sólo se pensara en emplear el uranio en productores de energía para la propulsión nuclear de medios de transporte de alta envergadura.

Pues bien, un proyecto de típica ingeniería química de alta complejidad es la producción de agua pesada y esa fue nuestra tarea. Ella fue muy bien vista por algunos desde dos puntos de vista: (a) la producción de energía por una parte y (b) el empleo de un proceso como el (a), al que poniendo muy bien a cubierto los riesgos típicos de la industria nuclear, es bien conocido que resulta ambientalmente extremadamente limpio. En cambio, fue mal vista por otros, que opuestamente, (a) consideran a la industria productora de energía basada en el uranio un alto riesgo para el ambiente y las personas y (b) no podían dejar de ocultar su idea de que detrás de un proyecto de esta naturaleza, en realidad había un objetivo bélico (que por otra parte constituiría, en el caso del uso del uranio pobre, una idea extremadamente anticuada).

### **La situación de los años 1970-1980**

Nuestro proyecto lo empezó a pensar la Comisión Nacional de Energía Atómica como una etapa muy reducida y sencilla, a comienzos de la década del 70 y no progresó mucho, en principio, por una inexplicable falta del adecuado desarrollo del Grupo de Procesos Químicos, frente a otros proyectos igualmente importantes, que trabajaban a plena intensidad en otras áreas de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). La fecha tiene bastante importancia.

En el año 1961, en forma subterránea y secreta, se afirma que en Pokhran, India hizo su primera explosión nuclear y posteriormente, en el desierto del Rajastán, el gobierno detonó con éxito e hizo público, su primer armamento nuclear, una bomba de fisión, de potencia

parecida a la lanzada sobre Hiroshima. India, que acababa de convertirse en la sexta potencia nuclear del mundo, había roto el monopolio de los cinco miembros del Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas, que constituían lo que pasó a denominarse más tarde, en forma popular, The London Club, a saber: Estados Unidos, Unión Soviética, Gran Bretaña, China y Francia. Tras el experimento, la India respondió a la crítica internacional, asegurando que utilizaría su poder nuclear sólo como arma de defensa contra China y Pakistán. El resto de los países poseedores de armas atómicas, en ese momento constituyó el grupo denominado The Nuclear Weapons States.

Argentina se vio muy perjudicada en su desarrollo recién comenzado en el año 1950 (fecha de creación), porque los países del Club de Londres cerraron todo el acceso a la información bibliográfica, directa o de visitas al resto de los países, en todo lo que involucrara industria nuclear, con un muy reducido grado de menor rigurosidad por parte de Francia; destacando el hecho de que para nuestro país, la información proveniente de lo que entonces era la U.R.S.S. y China, era desde hacía mucho tiempo atrás inalcanzable.

No sólo se cerró la posibilidad de llegada a la información, sino que lógicamente, ocurrió lo mismo con toda la tecnología, los equipos y los materiales asociados con el desarrollo de cualquier componente de un proyecto asociado a la aplicación de materiales nucleares con la excepción, en algunos casos muy comprobados, de que los mismos eran utilizados con fines medicinales, como ocurría con la producción de radioisótopos, que de cualquier manera eran controlados sigilosamente por la International Atomic Energy Agency (IAEA).

Vale la pena mencionar que en esa época, por considerarse discriminada, la Argentina no había firmado el Tratado de No Proliferación Nuclear (**NPT, Nuclear Non-Proliferation Treaty, 1968**) que fue abierto a la firma el 1 de julio de 1968, restringiendo la posesión de armas nucleares. Sólo a cinco Estados se les permitía en el tratado la posesión de ellas: **The Nuclear Weapons States (NWS)** que eran los únicos que hasta 1967 habían hecho pública la detonación de un ensayo nuclear. Bastante después, el 10 de febrero de 2005, la Argentina depositó en Washington el documento de adhesión al NPT aprobado por el congreso el año anterior.

## **El Comitente**

Esta es una breve descripción del contexto en que se iba a desarrollar el proyecto ya que el período 1975-1983 no era el más favorable para ejecutarlo.

La institución necesitada del proyecto era la CNEA. El hoy olvidado y por entonces formidable Tentativo Plan Nuclear diseñaba para el período que se iniciaba en 1977, la instalación de un mínimo de diez nuevas centrales nucleares, una cada tres años; para ellas se iban a necesitar alrededor de 4000 toneladas de agua pesada. Inicialmente, nuestro proyecto no pasaba de ser una parte importante por el aspecto que atacaba, pero muy reducida en comparación con lo que hubiera significado una planta piloto completa.

Con los cambios favorables producidos en los planes con respecto a nosotros, que se verán más adelante (el diseño de una Planta Experimental ÍNTEGRA), se pretendía que para el año 1982/3 nuestro proyecto estuviera en plena producción de forma tal que, no más de un año después, con sus datos se empezara a construir la planta industrial en uno o varios módulos.

Sólo la poca bibliografía que había logrado acumular la CNEA (y en un área de escaso crecimiento interno) hasta el año 1967, estaba disponible y era lamentablemente escasa y de muy poco contenido científico de detalle. Es decir, necesitábamos el máximo posible de ayuda. La única probable ventaja, y no era muy fácil verla de una manera que fuera positiva, era que el gobierno en el período 1976-1982 estuvo manejado por militares. Se podría pensar que entonces posiblemente ellos apoyaran el Plan Nuclear considerando que la CNEA desde

hacía varios años, a partir del año 1955, estuvo manejada por la Marina. Frente a todos los problemas, inconvenientes, persecuciones y muertes, el pensar en las ventajas que podía otorgar la presencia de una de las fuerzas armadas en el Gobierno Nacional, sólo aparecía como una minucia específica de escaso nivel, sobre todo porque al menos inicialmente, cuando se firmó el Convenio del proyecto, durante el Gobierno Constitucional del año 1975, ese ascendiente de la Marina no tenía mucho peso y sobre todo en un proyecto de reducida envergadura. Y aún menos, si el presidente de la CNEA se trataba de un marino ya retirado, el Alte. Iraolagoitia.

El presupuesto de la CNEA era razonable en esa época, pero nada del otro mundo. Las partidas asignadas en ese momento a la por entonces reducida área de Agua Pesada, a cargo del Ing. Qco. Aníbal Núñez (en que tanto él como el proyecto, navegaban a medias aguas con el Grupo de Procesos Químicos) eran relativamente bajas para un propósito que no iba más allá de la selección de una de las tecnologías existentes comprobadas como exitosas (aunque casi desconocidas para nosotros). Tratar de entender y probar una muy pequeña parte del funcionamiento de lo que podía ser considerada su base fundamental de operación, y de una envergadura que no excedía de una experiencia piloto de pequeña-mediana escala, sería y fue nuestro punto de partida.

### **El grupo ejecutor**

En febrero de 1975 cuando se iniciaron las primeras conversaciones se trataba de un pequeño grupo, liderado en ese momento por los únicos primeros dos doctores en ingeniería que había en la Argentina (de casualidad en química) y alrededor de doce ingenieros químicos, unos pocos técnicos y un administrativo. El grupo, partiendo exclusivamente de mí, lo había creado, en términos temporales precisos pero imaginarios, a mi regreso de EE.UU. en julio de 1968, pero en términos reales, a fines del año 1970 cuando, como resultado de las continuas y fuertes presiones que recibía del Dr. Bernardo Houssay, decidí hacer la prueba y quedarme en la Argentina. A mi aventura se agregaba la presencia de cuatro ingenieros recién recibidos que se las habían ingeniado para que el Decano les diera un cargo de Jefe de Trabajos Prácticos con dedicación exclusiva “para trabajar con el profesor que volvió y es doctor en ingeniería” y que, sin saberlo, por mi pacto personal con la palabra lealtad, afectaban mi forma de pensar en el tema retorno.

En realidad mi voluntad era quedarme hasta cumplir mi compromiso de dos años de Beca Externa del CONICET y regresar a EE.UU. donde sabía que me estarían esperando. Pero la tenacidad y perseverancia de don Bernardo y los fondos que casi podría decir que me forzó a pedir y se las ingenió para que me fueran adjudicados a pesar del formidable monto que representaba, fue más fuerte que mi resistencia. Han habido ocasiones en que me he sentido molesto por la decisión, pero no puedo negar que la mayor parte del tiempo me he divertido en gran forma. Hoy, con casi 80 años, y aún trabajando casi a pleno a pesar de mis enfermedades, todavía me aparecen dudas.

A partir de 1970 pude sacar provecho de una habilidad para pedir subsidios, aprendida en EE.UU. Fue fruto de “acatar”, a disgusto, las órdenes que me daba mi director de ayudarlo a solicitar fondos de envergadura para investigación (redactar el pedido). Aprovechando la creación en el año 1969 de la ex Función Ciencia y Técnica en el Presupuesto Nacional, que permitía pedir personal a la entonces Sub-secretaría de Ciencia y Tecnología, en 1972 crecimos en los recursos humanos hasta formar un grupo de alrededor de veinticinco personas. En realidad, posibles buenos investigadores no más de diez o doce. Porque mi grupo tenía mecánico, electrónico, un proyecto de vidriero, varios técnicos más y un par de administrativos para crecer en un plan, donde los muy buenos, a partir del año 1971 empezaron a salir al exterior a hacer doctorados (a pesar de que el CONICET no lo permitía pero yo me las

ingeniaba). De modo que los primeros años el grupo se iba a ir achicando a cualquier costo. Tener muchos más Ph. D. **con líneas de trabajo diferentes de la mía**, era un objetivo intocable. También en el mismo año había obtenido, luego de insistentes pedidos, un cargo de Profesor Titular con D.E. para un compañero mío a quien en 1966 le había conseguido una beca para estudiar en la misma Universidad que yo y regresaba después de haber hecho un posdoctorado de dos años adicionales. Se llama Ramón Cerro. De los Ph. D. en Ing. Qca. que he conocido en forma cercana, es uno de los mejores “tecnólogos”. Hace mucho que está de regreso en EE.UU.

En 1972, sobre la base de una extensa nota al CONICET, propuse crear un Instituto. Me respondió formando una comisión que hiciera el estudio de “factibilidad” para crearlo junto con la Universidad. En el CONICET se aprobó en diciembre de 1972 y la tercera semana de mayo de 1973 en la Universidad Nacional del Litoral (UNL). La Juventud Universitaria Peronista, al asumir el Rectorado de la Universidad en mayo (y no porque tuvieran algo en particular conmigo ya que, aunque no fuéramos copartidarios, no dejábamos de tener una relación amistosa razonable y algunos de ellos ya trabajaban conmigo) anuló algo hecho recientemente por la dictadura militar de 1966-1973 y dejó sin efecto la Resolución. Circunstancias muy especiales, hicieron que en junio de 1975 se creara el Instituto de Desarrollo para la Industria Química (INTEC) dependiendo del CONICET y de la UNL y me designaron Director del mismo. Ya en esos momentos teníamos cuatro ingenieros haciendo el doctorado en las mejores universidades norteamericanas y aproximadamente 300 m<sup>2</sup> de oficinas, laboratorios y una pequeña aula.

## Los intermediarios

Obviamente nosotros no tenemos capacidad de contratación en proyectos de envergadura aun pequeños. Lo hacemos por medio del CONICET y de la Universidad, mediante un Convenio. Tanto la Universidad como el Consejo vieron con buenos ojos (no de igual manera unos cuantos años después la Universidad) la firma del mismo. Como todos los casos en que está involucrada la burocracia del Estado tuvimos algunos problemas, pero por parte de la UNL obtuvimos en mayo de 1976 un importante aporte de personal. El CONICET nos empezó a fortalecer el presupuesto del Instituto a partir de diciembre de 1975 y nos dio doce Becas de Iniciación para marzo. Posteriormente, en octubre de 1976 nos hizo un muy buen refuerzo de personal.

En especial el CONICET, cuando en junio de 1976 se conoció la envergadura que había tomado el proyecto, fruto de una propuesta nuestra y la nueva trascendencia política, económica y tecnológica a nivel internacional que había adquirido, como se verá más adelante, trató adecuadamente nuestros expedientes que durante varios años manejaron el equivalente a más de un millón de dólares anuales, casi todos provenientes de la CNEA. En dicha oportunidad, me presenté a la Carrera del Investigador del CONICET porque creí que había llegado su tiempo, y la Comisión ad-hoc nombrada por este organismo, presidida por un investigador que ha llegado a ser presidente de la A.N.C.F.E. y N., produjo una designación inesperada. Esto puede dar una idea de la envergadura que había adquirido el asunto en que nos habíamos involucrado.

La relación con la CNEA se mantuvo siempre de manera excelente; lo propio ocurrió con el Consejo. Con la Universidad en cambio, el Rector designado por el Proceso, de mentalidad extremadamente cerrada, hizo que el trato fuese cada vez más complicado, hubo momentos en que fue necesaria la intervención del Presidente de la CNEA para evitar un conflicto institucional de envergadura.

## **DESARROLLO DEL PROYECTO I**

### **Partida**

Ya se ha comentado en la sección anterior la situación en que se encontraba el contexto general en el que podía estar inmerso nuestro trabajo. La descripción de nuestra tarea, debe interpretarse dentro de un entorno histórico que en los hechos hoy ha perdido parte de validez.

Comenzado a diseñar desde 1970, en 1975 la CNEA, una entidad que siempre gozó de, y mantiene, gran prestigio en el país, había lanzado y logrado hacer aprobar su Plan Nuclear 1975-1985, que contemplaba la construcción de por lo menos una central nucleoelectrónica cada tres años. Se tenía el convencimiento de que el crecimiento esperado del país demandaría una energía que ni los combustibles fósiles ni las posibilidades hidroeléctricas podrían satisfacer. Ya en 1974 estaba en construcción la segunda central atómica de energía (Embalse) y en 1977 se analizaban los detalles del lanzamiento de la tercera (Atucha II; hoy casi lista aunque un poco obsoleta). Y todo el país tenía gran orgullo por su desarrollo nuclear autónomo. El accidente de Three Mile Island (1979) ni el mucho más grave desastre de Chernobyl (1986) habían ocurrido (mucho menos Fukushima en Japón en 2011), ni se conocían problemas serios sucedidos con ninguna de las plantas existentes. Y desde el año 1968 el Club de Londres (como se sabe, formado por los países poseedores del conocimiento del ciclo nuclear completo de la producción de la bomba atómica) le había cerrado todas sus puertas a la Argentina. Personalmente yo todavía en 1970, dudaba de mi permanencia en la Argentina. En este marco, a principios de 1970 la CNEA ya había iniciado algunas tareas para tener su propia planta de agua pesada. A partir de éstas, comienza la nuestra.

### **Primeras tratativas**

A principios del año 1975 en nuestro conjunto de personas (provisoriamente denominado desde 1970, grupo de Ingeniería Industrial, simplemente para identificarnos dentro de la Facultad de Ingeniería Química con algo) recibimos la visita del Ing. Qco. Aníbal Núñez que me conocía a mí por referencias, habida cuenta de mi decisión de interactuar todo lo posible dentro del sistema científico tecnológico, dado que una vez resuelto a quedarme en el país, no pensaba hacerlo solamente sentado en mi escritorio. Sobre esa base me movía por todas partes tratando de crecer sin descuidar mi actividad científico-técnica que era, después de formar recursos humanos en el cuarto nivel, mi segunda prioridad íntimamente asociada a la anterior. En cambio, Ramón Cerro había convivido con Aníbal algunos años en la Facultad de Ingeniería Química como estudiante.

Aníbal venía de recorrer los grupos de Ingeniería Química de Bahía Blanca (pronto reconocidos como el PLAPIQUI o Planta Piloto de Ingeniería Química) y el grupo de Ingeniería Química y el de Tecnología Química (funcionando en Facultades diferentes) en La Plata. Los tres grupos les habían hablado de nosotros. Tenían como idea hacer un proyecto compartiendo la tarea entre los cuatro, coordinada desde Buenos Aires.

En abril-mayo de 1975 estábamos negociando la recreación del INTEC, donde una de las mayores dificultades era que el propuesto como Director por el CONICET no era de filiación justicialista. Es más, aunque por escaso tiempo (desde 1954 hasta 1956) es cierto que había sido identificado como uno de los reconocidos dirigentes estudiantiles del antiperonismo, ese argumento parece que no fue de peso para el Rector y me llamó para decirme que ninguna objeción contra la propuesta del CONICET había pasado por mis aptitudes científicas o mi conducta personal, a excepción de no tener vinculación con el justicialismo, y en consecuencia, había decidido designarme.

Mi aceptación fue condicionada a que el nuevo instituto (INTEC) no dependiera de la Facultad de Ingeniería Química, sino directamente del Rectorado, porque lo contrario era

convivir en una fuente de obstáculos y celos que frenaban permanentemente mis posibilidades de crecer.

Consideramos que un proyecto que “suponíamos” algo complejo (porque acerca de él conocíamos muy poco) no se podía repartir entre cuatro sitios geográficos muy separados (Bahía Blanca, Buenos Aires, La Plata y Santa Fe) en una época en que los sistemas de comunicación rápida no superaban el Télex, nosotros rechazamos el ofrecimiento. Manifestamos que de hecho podíamos hacerlo pero no en esas condiciones.

Ocurría que producto de conflictos internos resultantes de ciertos recelos y resquemores relacionados con los Ph.D. de los cabezas del grupo, no teníamos ninguna carga docente de grado obligatoria. El doctorado que era uno de nuestros proyectos principales estaba lejos de concretarse por similares motivos, y nos limitábamos a dar cursos de posgrado, para que nuestra gente y algún otro que le interesara, tuviera una preparación teórica equivalente a los cursos que recibirían en un programa doctoral norteamericano y hacer investigación en nuestras áreas de trabajo.

Tiempo después regresaron (mayo de 1975) con la propuesta de que los demás grupos tenían fuertes compromisos docentes de grado y, en especial, el grupo de Bahía Blanca estaba lanzando sus líneas prioritarias de trabajo que eran petroquímica (recordar el Polo) y alimentos (Valle del Río Negro). En resumen, todos renunciaban a favor nuestro. Nuestra respuesta fue solicitar un plazo de dos meses para saber si el INTEC salía adelante o no. Si se creaba, la respuesta iba a ser sí. Nuestros jefes serían el Rector y el Presidente del CONICET, con muy pocas modalidades de molestar en los Institutos que trabajaban sin crear problemas.

En junio informamos de nuestra decisión positiva porque se había creado el INTEC y comenzamos a trabajar con el grupo de la CNEA en el bosquejo del proyecto y de un posible Convenio para hacer en tamaño piloto uno o dos platos de una columna de intercambio isotópico, al estilo de las plantas de agua pesada canadienses y no mucho más. Sobre todo por nuestra ignorancia del tema y la necesidad de trabajar previamente sobre lo que ya conocía la gente de la CNEA.

En resumen, un proyecto interesante que constituía un gran desafío. Era importante para nosotros arrancar con un desarrollo de ese tipo aunque no se tratara de un proyecto de gran envergadura. Para poder cambiar las cosas, era necesario que supiéramos un poco más del tema.

### *Anécdotas que acompañan el ejercicio de la vocación*

*Vale la pena relatar una anécdota. Volviendo de Buenos Aires, durante un vuelo, Ramón Cerro me preguntó: “¿Vos sabés cómo son los distintos procedimientos para hacer agua pesada?” Mi respuesta fue, “nada más que al pasar, y no me preguntes mucho más”. El me dijo: “A mí me pasa lo mismo, pero, ¿vos pensás que el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de California donde estudiamos nosotros dos, no hubiera buscado un acuerdo entre varios profesores para hacerlo en lugar de rechazarlo?” Mi respuesta final en la que concordamos fue: “Si el grupo está de acuerdo en trabajar conforme a un cronograma, sin reloj ni días feriados, deberíamos agarrar viaje. ¿O para qué estudiamos y tomamos cursos de posgrado además de nuestra tesis?” En resumen: arrancamos conociendo muy poco.*

El 23 de diciembre de 1975 se firmó el Convenio con la intervención del Rector (el abogado Dr. Marini), el Presidente del CONICET (Dr. Cicardo) y el Presidente de la CNEA el Alte. Iraolagoitia. Lo recuerdo porque con Cerro nos quedamos varados en Buenos Aires por la toma del Aeroparque por el Brigadier Capellini. Volvimos a Santa Fe por el favor de un amigo que nos ayudó a conseguir un medio para hacerlo.

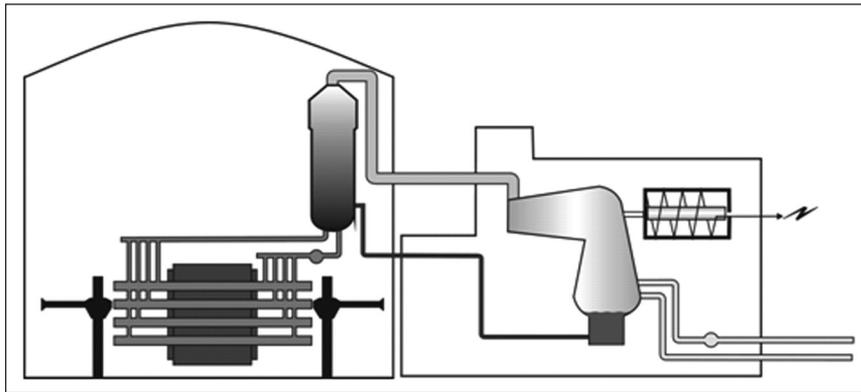


Figura 4. Reactor Candú

Dado que la CNEA necesitaba tiempo para poder girar los primeros fondos, se decidió que el proyecto no empezaría hasta el 2 de marzo de 1976 (fecha que conviene recordar). Pero debe quedar en claro que en esa fecha nos empezamos a zambullir en un pedacito de lo que era una planta de agua pesada, lo que equivalía a sumergirnos profundamente, aunque sin querer, en el Plan de los Reactores Nucleares que trabajan con agua pesada y en su gran mayoría pertenecen a los denominados Reactores CANDU (“CANada Deuterio Uranio) de la tecnología denominada Pressurized Heavy Water Reactors como se puede ver en la Fig. 4.

## EL AGUA PESADA

En relación a nuestro proyecto hay dos temas macroscópicos que deben entenderse primero aunque sea superficialmente para poder capturar sus alcances: (1) Lo que es un reactor que trabaja con uranio pobre, y más específicamente el tipo Candu y (2) lo que es el agua pesada y algo respecto a sus plantas de producción.

## Reactor Candu

El Reactor Candu pertenece a un tipo de EQUIPO operado con agua pesada presurizada (PHWR) desarrollado inicialmente por un Consorcio de Empresas Estatales Canadienses y uno de Empresas Privadas del mismo país. A pesar de su extrema complejidad es sencillo de explicar. Los reactores Candu y sus familias similares utilizan como combustible uranio natural. Recurriré al Reactor de EMBALSE de la CNEA para describirlos brevemente. Utiliza tubos a presión en un arreglo que separa el refrigerante del moderador usando siempre agua pesada. La parte fundamental está contenida totalmente en un tanque al que se ha denominado calandria. La Fig. 5, muy clara, acompaña y facilita la descripción. En la calandria está ubicado un conjunto de tubos horizontales que van de una punta a la otra. En éstos están las más pequeñas barras de grageas cerámicas de combustible nuclear.

En los tubos, el combustible es refrigerado con agua pesada denominada refrigerante primario que llega hasta los 290 °C sin entrar en ebullición por la alta presurización de los mismos. Este reactor tiene la ventaja de que el refrigerante primario crea en el secundario una corriente que mueve las turbinas. La calandria es recorrida por tubos verticales, independientes de los horizontales que cumplen la función de moderación y control del flujo de neutrones que genera el combustible. Además, tiene los elementos necesarios para apagar el reactor. La reacción en cadena que produce el uranio (combustible) es controlada por el moderador. La ausencia del mismo descontrola la reacción en cadena del uranio con el resultado de obtener

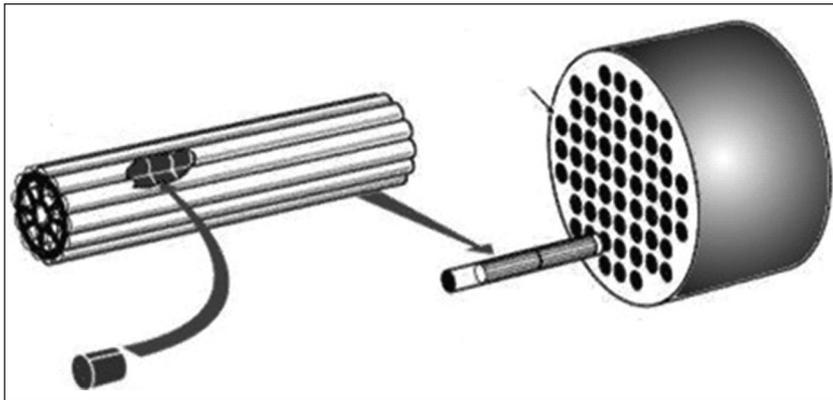


Figura 5. Calandria – Conjunto de tubos horizontales en los que están las grageas cerámicas de combustible nuclear

un “producto” diferente y no deseable por nadie. El agua pesada de los tubos horizontales (refrigerante primario) va a los generadores de vapor donde el calor contenido en ella se transmite a agua común, que genera vapor y va a las turbinas que generan la energía eléctrica. El recipiente contiene también el refrigerante secundario, que igualmente es agua pesada pero no enfría de forma importante sino que, como se citó anteriormente, trabaja en la función de moderación controlando la reacción en cadena que se produce en el combustible. Estos, cuando se enfrían con el primario generan casi toda la energía que produce el reactor.

Así como parece de sencillo el funcionamiento, es la complejidad que tiene este diseño para convertirlo en un equipo seguro. Pero vale la pena aclarar que el Reactor de Embalse, en un promedio grosero tiene prácticamente el doble de ingeniería argentina que el de Atucha (el primero de la Argentina) y con la misma rudeza en las estimaciones, ello constituye más del 50% de la “tecnología” total de todo el reactor.

## El Agua Pesada

Es parte de la base de seguridad de los reactores CANDU. Hay muchos elementos (o moléculas) químicas que tienen un compuesto “paralelo” que se denomina isótopo (a veces más de uno diferente) que tienen propiedades físicas y químicas similares pero se diferencian por su masa (atómica o molecular). Esta diferencia puede ser más importante si se trata de una molécula de relativamente bajo peso molecular. La diferencia entre un isótopo y otro es la existencia adicional de uno o más de un neutrón, de masa molecular 1,00137 (algo mayor que el protón). Así, el pasaje del uranio de su forma isotópica 235 a 238, incrementa su masa atómica en tan solo un poquito más que 3,00 g (o sea del orden de 1,27%). En cambio el pasaje de hidrógeno (protio) al deuterio, implica un incremento en su masa atómica de 100,7% (de 1,007 a 2,014 g).

Como se observa en la Fig. 6, el hidrógeno tiene tres isótopos naturales, el hidrógeno natural o protio, el isótopo que tiene un neutrón agregado o deuterio y el que tiene 2 adicionales o tritio. Sus masas atómicas van creciendo de 1,007 a 2,014 y 3,021 aproximadamente.

Es conocido por todos que el agua natural tiene una forma muy aproximada dos hidrógenos y un oxígeno. Pero de acuerdo al razonamiento anterior, la presencia de isótopos del hidrógeno hace que en una visión más exacta se examine al agua de una manera un poco diferente.

Una molécula de agua que tuviera un oxígeno (O) y dos deuterios ( $D_2$ ) tendría una masa molecular de 20 en lugar de 18 como el agua común.

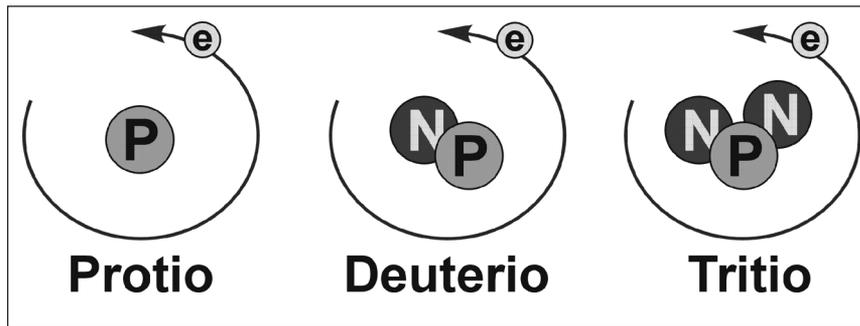


Figura 6. Isótopos naturales del hidrógeno

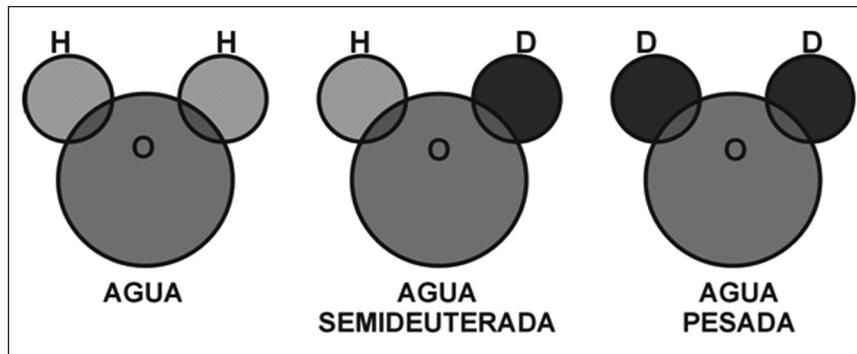


Figura 7. Agua Pesada

De allí el nombre de Agua Pesada (Fig. 7). Es inodora, incolora e insípida, no es radioactiva pero indigesta y sus propiedades físicas y químicas son algo distintas. Por ejemplo difieren bastante en la densidad y la viscosidad, para citar dos casos. Expresada en términos de agua pesada pura, el agua natural tiene entre 120 y 155 partes por millón de la primera. De éstas, sólo 20 resultaban técnicamente recuperables en forma razonablemente económica en el año 1970, por lo que para producir un litro de agua pesada casi pura (la pureza nuclear debe ser mayor al 99,75% y se busca que el producto sea aún mejor) se deben procesar como mínimo 50.000 litros de agua natural.

Salvo su uso en experimentos biológicos, la única aplicación masiva del agua pesada es la de actuar como moderador (controlador) del flujo de neutrones dentro de un reactor nuclear y refrigerarlo (Fig. 8). Cuando en los reactores se emplea uranio natural o pobremente enriquecido (es decir, no concentrado) como hasta el presente en la Argentina, no se puede utilizar con estos fines agua natural porque absorbe demasiado los neutrones y prácticamente paraliza el funcionamiento del equipo. Para el mismo objetivo, el agua pesada dependiendo del grado de pureza es de 30 a 70 veces más eficiente. Para su plan, la CNEA necesitaba aproximadamente una producción estable no inferior a las 80 toneladas anuales (es decir, casi 75.000 litros por año); sabiendo que en los primeros, podría tener que comprarla hasta tener suficiente stock. En cualquier caso el proyecto a largo plazo era construir con su propia tecnología una planta industrial que produjera 200 toneladas por año.

### La producción de agua pesada

El primer proceso para producir industrialmente agua pesada fue la electrólisis, utilizada por los noruegos para fabricarla por exigencia de Alemania en la Segunda Guerra

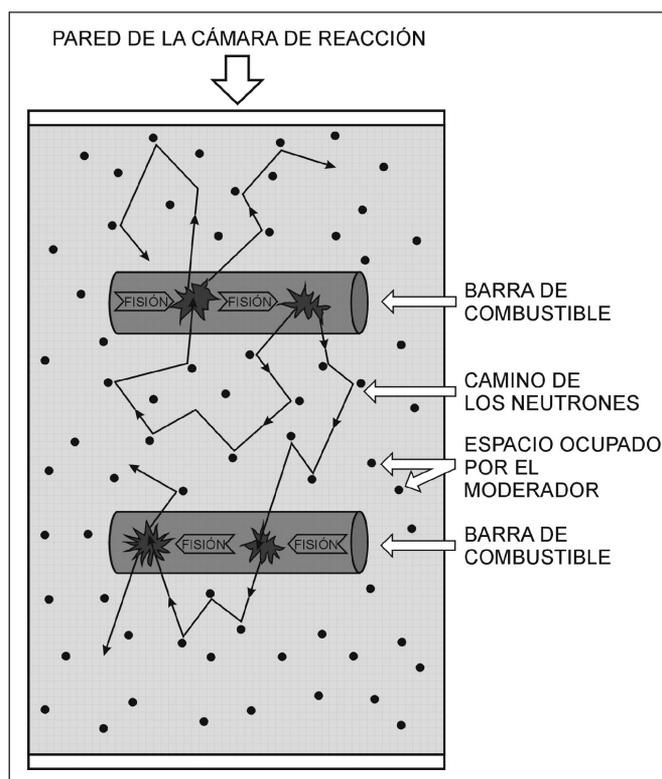


Figura 8. Función del moderador

Mundial. Casi simultáneamente, los estadounidenses usaron destilación en Savannah River Site, pero con la combinación de métodos empleando la separación de los isótopos de la mezcla Sulfuro de Hidrógeno - Agua ( $\text{SH}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ) como veremos enseguida, la destilación y ulteriormente la electrólisis. En la carrera con Alemania, el potencial tecnológico del proyecto Manhattan (bomba atómica) era muy superior.

Pocos años después el liderazgo tecnológico en la producción de agua pesada sería tomado por los canadienses. Ellos optimizaron el proceso Girdler - Sulfide ya usado por los norteamericanos. De esa forma fueron los productores más avanzados y en mayores escalas de agua pesada y en el desarrollo de los reactores Candu usando uranio pobre. Hoy se sabe que el proceso Amoníaco - Agua ( $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ ) que finalmente compró la CNEA como se verá más adelante, e instaló en Arroyito (Neuquén) es casi seguramente el más eficiente y a la vez el de mayor capacidad existente.

Postergaré la descripción de detalle del método Girdler - Sulfide porque con variantes pero tratando de llegar a lo mismo, lo usamos nosotros a partir de los mínimos conocimientos que existían. Dicha labor y los problemas que creaba para nosotros el pedido recibido, serán relatados después de comentar el proceso de inicio de la participación del INTEC.

## LA INTERVENCIÓN DEL INTEC

Durante el proceso de tratativas, en julio de 1975 la gente de la CNEA volvió a Santa Fe, como se comentó antes, a buscarnos para que trabajáramos solos. Se trataba de un proyecto relativamente reducido para simular una porción pequeña de una columna de intercambio isotópico ( $\text{H}_2\text{O} - \text{SH}_2$ ). Luego de firmar el Convenio recién en diciembre, para

salvar los detalles de la burocracia, se había fijado por razones económicas (envío de fondos) comenzar a trabajar el 2 de marzo de 1976. Este lapso es un triunfo pensando en el habitual manejo de los fondos del Estado.

Acá comienzan a jugar en los aspectos vocacionales las capacidades científico-tecnológicas que poseíamos. Que quede claro; no lo que sabíamos de agua pesada o procesos de separación, porque si eran medianamente inteligentes (y además Aníbal Núñez era Ing. Qco.) la gente de la CNEA no podía ignorar que tendríamos que saber muy poco.

Pero nosotros hicimos un análisis diferente. En relación a lo que se debería hacer: (a) ¿Qué conocimientos involucra qué debe saber un buen Ing. Qco.? (b) ¿Cuánto de la competencia y erudición **total** que sería necesaria, normalmente ignora un Ing. Químico. y es propio que sea así? Indicaremos con un 1 lo que podíamos cubrir más o menos bien y con un 0 lo que era muy difícil que pudiéramos manejar con solvencia. A) Matemática 1, B) Física 1, C) Química (algunos) 1, D) Termodinámica 1, E) Físico-Química 1, F) Fenómenos de Transporte (algunos) 1, G) Operaciones Unitarias 1, H) Reactores 1, I) Catálisis (algunos) 1, J) Tecnología del Calor (algunos) 1, K) Electrotecnia 0, L) Computación (algunos) 1, M) Control (algunos) 1, N) Tecnología de Materiales 0, O) Construcciones Industriales 0, P) Mecánica 0, Q) Seguridad 0.

Esto demuestra un poco las principales disciplinas que abarca la Ingeniería Química, con la única salvedad de que aquellos más dedicados a Reactores e Ingeniería de Procesos, usualmente y aunque parezca mentira, no sentían un extraordinario gusto por la Química. Hoy esto está cambiando mucho, porque la profesión como tal apunta a cosas diferentes, que están muy influenciadas por la Micro Ingeniería Química y las Nanotecnologías que la requieren en gran medida. El que no vea esto, está perdiendo el tren lastimosamente. Y lo mismo, los que no caminen por la mezcla de la vieja Ingeniería Industrial con la nueva Ingeniería de Procesos y los Análisis de Sistemas, seguirán moviéndose en globos aéreos. Hay toda una nueva Ingeniería Química, diferente de la que predominó entre 1940 y 1980 que ha desplazado a la petroquímica y sus derivados de gobernar las líneas de trabajo preponderantes en esa época que, por el momento, antes de finalizar el Siglo XX, habrían alcanzado su estado *quasi* estacionario.

Analizado integralmente, concluimos que trabajando muy fuerte y recurriendo a algunos asesoramientos externos, estábamos en condiciones de salir adelante. **En resumen, en este estado y circunstancias, un grupo mayoritariamente de ingenieros químicos se embarcó en un proyecto que, en condiciones muy adversas, complicadas interna y externamente por factores que no ayudaban en nada a la tarea, involucraba hacer una parte aislada y representativa, relativamente reducida a nivel Planta Piloto, de una parte del proceso de producir agua pesada, arrancando casi desde cero.** Y comenzando desde el punto de partida en que se pretendía llevar a cabo el estudio de sólo una parte de la planta, todos pensábamos con algo de pesimismo, que así se aportaría muy poco al país. Pero al menos, teníamos claramente definido nuestro problema.

Los que nos convocaron ignoraban que a Cerro y a mí nos estaban tentando con un proyecto que por sus características, junto al grupo de personas con quienes trabajábamos, lo pensábamos de otra manera. Y que, sin entrar a considerar si teníamos los conocimientos para hacerlo, porque no vienen al caso en este momento de tantas ignorancias, lo que sin duda nos sobraba era audacia para probarnos a nosotros en el desarrollo de algo que parecía estar muy cerca de lo que fueron las vocaciones iniciales (en los dos casos, menos de quince años atrás) y en el resto con una experiencia que variaba entre cero y seis o siete años). Muy pronto, consideramos al proyecto como la víctima de un enfoque erróneo de lo que era posible hacer, si en los hechos se quería completar el ciclo de la tecnología nuclear argentina. En otras palabras, enseguida el grupo iba a intentar cambiar lo que se les pedía que hicieran.

En marzo de 1976, por una circunstancia casi accidental, su vocación les reclamaba intentar reformular el enfoque.

Conscientes de nuestras limitaciones y sobre todo gran inexperiencia y desconocimiento sobre el tema, no nos tomamos vacaciones y comenzamos a preparar a nuestra gente y a trabajar el 2 de enero de 1976. El CONICET nos dio doce becas y por medio de un curso de ingreso (Vectores y tensores y las ecuaciones de balance en transferencia de cantidad de movimiento, energía y materia), que dicté durante dos meses, tomamos los mejores ingenieros químicos y matemáticos casi recién egresados que pudimos encontrar en el país, con el riesgo de gastar los pocos fondos que teníamos en sacar pequeños avisos en algunos diarios. A su vez, los que sabían, les enseñaban computación a todos y por otra parte, Cerro comenzó a actualizarlos en algo muy nuevo (en parte también para él) que era el diseño de procesos asistidos por computadoras. El personal permanente que venía de antes, comenzó a estudiar el tema de la propuesta de la CNEA con la muy poca bibliografía que existía y, a mediados de marzo, habíamos adelantado mucho más de lo esperado en el cronograma y teníamos claro lo que nos esperaba y en especial, que no nos gustaba.

Como cité antes, en el grupo se había tomado el compromiso de que no existían feriados ni horarios a cumplir porque nos estábamos jugando, desde el primer día, en algo que podía ser no sólo muy interesante, sino también muy valioso (y no precisamente desde el punto de vista salarial). De no haber ocurrido así, el “Rodrigazo” hubiera desmembrado todo y el INTEC recién creado en junio de 1975, hubiera desaparecido. Pero toda la gente joven sabía que tanto Cerro como yo, teníamos ofertas de afuera y las habíamos rechazado para hacer este proyecto. Esto también ayuda a entender el significado de la vocación. No a cualquier Ing. Qco. le aparece una oferta de este calibre “prospectivo” para usar lo que cree que aprendió.

El 24 de marzo de 1976 se produjo el golpe militar y supusimos que el proyecto podría estar peligrando. En este aspecto, la suerte nos favoreció (no tanto a otros por supuesto, pero eso ya es una triste historia política y policial conocida). Fue designado presidente de la CNEA el entonces Capitán de Navío Carlos Castro Madero (Dr. en Física egresado del Instituto Balseiro y con un Ph.D. de EE.UU.) y como su asesor el Coronel (R.E.) Héctor Antúnez (Dr. en Física, ídem); (primero en su camada de coroneles y obligado a retirarse por una discusión con el General Lanusse en cuanto a la posición que debía tener el Ejército en el Plan Nuclear, a semejanza de la Marina).

Accidentalmente y por otros motivos (la impulsión de doctorados en ingeniería en la Argentina) ambos eran muy conocidos míos desde el año 1971 y lo fueron de Ramón Cerro terminando 1972. Nos invitaron a ayudarlos cuando ambos estaban en el Servicio Naval de Investigación y Desarrollo (SENID) a armar un programa doctoral para enviar a los ingenieros del SENID a hacerlo en el exterior, en las diversas ingenierías y diferentes buenas universidades, pagados con fondos del Servicio.

A fines de marzo nos llegó un mensaje telefónico (del Secretario Privado del Presidente de la CNEA) de seguir adelante. Quince días después, con doce horas de anticipación, nos llegó el aviso de una inspección para ver el estado del proyecto (típico comportamiento militar). Llevábamos casi tres meses de adelanto en el cronograma por haberlo comenzado antes. Resultado: De inmediato nos convocaron en Buenos Aires.

## **LA PLANTA PILOTO DE AGUA PESADA**

Fuimos con la propuesta de borrar el Convenio y hacer uno nuevo por una Planta Piloto COMPLETA de Agua Pesada y con Cerro expusimos nuestras ideas, casi conscientes de que tanto Castro Madero como Antúnez, nos conocían bastante bien. Tuvimos una muy fuerte discusión (yo en particular, que fui acusado de tener mentalidad jesuítica) con el Ing. Cosentino, Jefe de las Centrales Nucleares que se oponía a nuestra propuesta de hacer un

MÓDULO COMPLETO experimental y elaborar proyectos para seis rangos diferentes de producción de agua pesada (1; 2,5; 5; 10; 15 y 20 toneladas por año), empleando el sistema sulfhídrico-agua ( $\text{SH}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ) y determinar su costo aproximado. La idea era que luego se podía reproducir el Módulo de 20 toneladas diez veces para producir las 200 toneladas que era el óptimo deseable de la CNEA.

Por el salto de una partecita de la planta al MODULO COMPLETO, los cambios presupuestarios serían importantes porque se hablaba de construir una PLANTA COMPLETA. Pasar de lo que eran en el año para el INTEC aproximadamente cincuenta mil dólares (equivalente en pesos) a aproximadamente un millón de dólares anuales. Pero se tenía la gran posibilidad de contar con una planta chica completa y pelear con el exterior.

Castro Madero aceptó nuestra nueva idea y optó de entrada por la planta de 20 toneladas y eventualmente los cambios de escala. Se modificó el Convenio para hacer una Planta Piloto de Agua Pesada real (P.P.A.P.) a la que más tarde se denominó Planta Modelo Experimental de Agua Pesada (P.M.E.A.P.). Castro Madero le dijo al Ing. Cosentino que nos hiciera un Convenio del estilo que les hacían a ellos los canadienses (siempre por arriba de lo que correspondía) por los reactores Candu, porque sabía que hasta ahora el INTEC venía perdiendo plata (se lo habíamos comentado mientras bajábamos en el ascensor desde su oficina a la sala de reuniones).

Se nos impuso un cronograma y nos pidieron que elaborásemos un presupuesto. A los treinta días teníamos todo aprobado, lo que multiplicaba los aportes monetarios de la CNEA al nuevo contrato prácticamente por veinte. A cambio de esto, nosotros renunciábamos a continuar con nuestros proyectos de investigación actuales y a la publicación de los resultados de nuestro trabajo de Agua Pesada, es decir “full time”; lo cual en el marco del CONICET era y sigue siendo muy peligroso. Pero al menos durante el período 1976-1981 y luego de muchas discusiones, pudimos sortear parcialmente el problema (porque las críticas de algunos nunca cesaron) con un informe anual del Presidente de la CNEA que señalaba su satisfacción con los resultados del trabajo ejecutado y para el cual hacía muy fuertes aportes de dinero.

A partir de allí recibimos un decidido y permanente apoyo del CONICET, algo de la UNL (sólo durante los primeros meses, porque después mi relación con el Dr. Maldonado que era el Rector interventor se fue volviendo conflictiva) y por supuesto de la propia CNEA, incluyendo el del Ing. Cosentino una vez que el Presidente aceptó la idea.

### **Las características del convenio**

A esta altura, vale aclarar que para evitar cualquier roce, habíamos decidido que yo era el Director General del Proyecto y Ramón Cerro tomaba el rol de Director Técnico. Respecto del trabajo en particular, nuestras responsabilidades e injerencias eran equivalentes, pero Ramón concentraba su tiempo especialmente en el agua pesada (y podía decidir en esa área sin necesidad de consulta previa mía, sin que por ello no fuera después informado) y yo en cambio, sin alejarme para nada de los aspectos técnicos en la medida de lo posible, mantenía la totalidad de las responsabilidades de gestión en las mismas condiciones, incluyendo lo que significaba el desarrollo del INTEC en otros aspectos. Se verá más adelante que si bien esta organización fue buena internamente, a mi me reportó algunas consecuencias “externas” bastante desagradables. Yo no podía mantenerme alejado del proyecto porque, por ejemplo, por razones familiares, en 1977 Ramón tuvo que hacer un año sabático en EE.UU. y todo quedó a cargo mío; pero ya el equipo estaba funcionando y hubo pocas complejidades que no se pudieran resolver.

## Los objetivos

Nuestras responsabilidades como INTEC eran:

Desarrollar la Ingeniería Básica con el mayor grado de información posible (ex profeso, para conocimiento detallado de las empresas externas) y entregarla a más tardar el 1° de marzo de 1978. Incluía también el sistema de control, el análisis estadístico de fallas, las especificaciones de redundancia (equipos críticos que deben estar hasta triplicados) y la definición precisa de todos los materiales de construcción de todas las partes críticas de la planta.

Supervisar el desarrollo de la Ingeniería de Detalle a ejecutar por la empresa que ganara la licitación para la construcción de la planta sobre la base de nuestra Ingeniería Básica.

Supervisar la construcción y el montaje por parte de la misma empresa.

Tomar la responsabilidad de la puesta en marcha. Incluía la redacción de todos los manuales de operación, políticas de puesta en marcha y parada, régimen de seguridad, programas de mantenimiento y la capacitación del personal de la CNEA para operar la planta.

El cronograma inicial de la P.P.A.P. se extendía hasta los años 1983/4. Teníamos como objetivo final a posteriori, una planta productiva de 80 toneladas de agua pesada por año. **Además fuimos advertidos de que si, como consecuencia del llamado a licitación para las etapas 2, 3 y 4, los expertos de las empresas internacionales se daban cuenta (a través de la información de nuestra Ingeniería Básica incluida en dicho llamado y a propósito) que habíamos logrado desarrollar nuestra propia tecnología y, por razones políticas y económicas se abría el mercado de proveedores (para no perder el negocio) no seríamos esperados para desarrollar la planta de 80 toneladas por año.**

El preaviso se concretó a fines de 1978 y fue la confirmación de que no nos habíamos equivocado en nuestro trabajo. Colaboramos en el análisis de los pliegos presentados en la licitación y más tarde fue la planta con el proceso de amoníaco-agua existente en Arroyito (ver Fig. 9). Pero la CNEA continuó con nuestro proyecto, para tener el reaseguro de su propia tecnología. De este punto sólo tomamos conocimiento Ramón Cerro y yo. La información no fue bajada a los investigadores jóvenes.



Figura 9. Planta de Arroyito

### Anécdotas que acompañan el ejercicio de la vocación

Vale la pena comentar una anécdota doble: (a) Luego del llamado a licitación, fuimos invitados a visitar las plantas de agua pesada canadienses (donde nos mostraron sólo el 85% de lo que nos hubiera gustado ver y muchas preguntas quedaron sin respuesta) y (b) durante el análisis de los pliegos, tuvimos oportunidad de conversar con los expertos de las empresas extranjeras que concurrieron. Les preguntamos por qué ahora ofrecían vender. La respuesta fue: "¿Por qué vamos a perder el negocio, si ustedes ya disponen de la tecnología y en pocos años pueden tener la planta con la tecnología SH<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O propia que ya desarrollaron? Con ella sólo tendrán a la sumo algunos problemitas al principio". En resumen, no estábamos equivocados.

## PRODUCCIÓN DE AGUA PESADA POR EL MÉTODO DE INTERCAMBIO ISOTÓPICO SH<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O

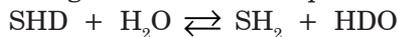
A continuación explicaré con más detalle sin violar acuerdos de confidencialidad ni complicar el contenido y objetivo de este trabajo, el proceso que desarrollamos nosotros. Es decir, de una manera muy general.

Hemos mencionado que antes de que se instalara la Planta de Agua Pesada en Arroyito (por parte de la CNEA) por el proceso NH<sub>3</sub> - H<sub>2</sub>O, el método más efectivo era el de intercambio SH<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O.

El fundamento es la posibilidad de intercambio de hidrógeno y deuterio entre dos compuestos que los poseen como el sulfuro de hidrógeno y el agua.

Esto requiere de ciertas condiciones físico-químicas que, muy brevemente describiremos ahora.

La siguiente reacción es posible:



La constante de equilibrio es:

$$K = \frac{[\text{HDO}][\text{SH}_2]}{[\text{H}_2\text{O}][\text{SDH}]} = \frac{[\text{HDO}][\text{H}_2\text{O}]}{[\text{SDH}][\text{SH}_2]}$$

Si H y D fueran idénticos químicamente, K sería igual a 1. Como no lo son, no sólo difieren, sino que dependen de la temperatura:

$$K = 2,37 \quad \text{a} \quad 25^\circ\text{C}$$

$$K = 1,84 \quad \text{a} \quad 128^\circ\text{C}$$

Queda claro que la concentración de HDO en agua es mayor que la concentración de SDH en sulfuro de hidrógeno.

Más importante, incrementando la temperatura la concentración de SDH aumenta en el sulfuro de hidrógeno. Por la tanto las diferencias de las K y el efecto de la temperatura en ellas, permite separar los isótopos.

Hay diversas variantes para aplicar estas posibilidades. Ellas dependen de las fases (gas o líquido) en que se hacen operar los reactivos en las torres de intercambio isotópico que es donde se producen las reacciones. Esta distinción de fases ocurre con el agua y el sulfuro de hidrógeno principalmente, porque el DHO, D<sub>2</sub>O, DHS y especialmente D<sub>2</sub>S se encuentran siempre en bajas concentraciones (el D<sub>2</sub>O como máximo alcanza el 30% en la última torre de un total de tres) y no afectan sensiblemente las fases que pueden existir. Aun así, las variantes posibles que nosotros exploramos para buscar el óptimo fueron siete. Explicaré una sencilla.

Un compuesto como por ejemplo el sulfuro de hidrógeno ( $\text{SH}_2$ ) que tenga hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), tiene también una proporción reducida de deuterio (como SDH mayormente). A una dada temperatura (por ejemplo  $30\text{ }^\circ\text{C}$ ) y presión (desde 20 atmósferas para arriba) por la reacción química de “intercambio” le cede parte del deuterio (D) que tiene al agua natural (que sólo posee, por ejemplo, 145 ppm de  $\text{D}_2\text{O}$  y casi todo como DHO) y la enriquece un poco. De esta parte enriquecida (por ejemplo hasta llegar a 600 ppm de  $\text{D}_2\text{O}$ , pero siempre la gran mayoría como DHO) se separa una porción y se pasa sucesivamente a equipos similares en etapas posteriores para que se repita el procedimiento y se enriquezca cada vez más. Pero otra parte (concentrada como se dijo en 600 ppm de  $\text{D}_2\text{O}$  pero como DHO, sigue hacia a otra columna (dibujada debajo y así armada en la práctica) donde, a otra temperatura (por ejemplo  $130\text{ }^\circ\text{C}$ ) y la misma presión anterior, se produce la reacción de “intercambio” INVERSA. El agua (con 600 ppm de  $\text{D}_2\text{O}$ ) se empobrece en  $\text{D}_2$  (y pasa a tener 125 ppm de  $\text{D}_2\text{O}$ ) y concentra el deuterio (en el sulfuro de hidrógeno empobrecido de la alimentación obteniéndose un sulfuro de hidrógeno bastante enriquecido en  $\text{SD}_2$  y que como en el caso del agua, está mayormente como SDH) que así enriquecido, fluye hacia arriba en la misma columna. Repitiendo la operación en varias etapas equivalentes (dos o tres como mínimo), se llega a una concentración del 10-30% de agua pesada y a partir de allí, se alcanza el 99,80% deseado por medio de una difícil destilación de dos compuestos muy parecidos. De esta forma, a la planta ingresa agua con 145 ppm de  $\text{D}_2\text{O}$  (casi todo como DHO) y devuelve al río agua empobrecida con 125 ppm de  $\text{D}_2\text{O}$  (ídem), la diferencia, en sucesivas etapas de enriquecimiento, permite llegar a la concentración del 99,80% de  $\text{D}_2\text{O}$  al final del proceso (no al final de los intercambios isotópicos) y ahora sí como agua pesada y muy poquito de agua semideuterada).

Esencialmente son una serie de torres de intercambio isotópico (normalmente tres) y una de destilación al final, todas ellas muy especiales. La parte superior de todas las de intercambio isotópico trabaja entre  $28$  y  $32\text{ }^\circ\text{C}$  (que no se varía; se usa una dada temperatura y no cualquiera en el rango) y la parte inferior de todas ellas, entre  $132$  y  $128\text{ }^\circ\text{C}$  (ídem). En la superior, el agua se enriquece en deuterio quitándose al sulfuro de hidrógeno. La inferior desde el agua algo mejorada, enriquece el sulfuro de hidrógeno “virgen”. A la torre 2 pasa bastante agua enriquecida y entra nuevamente más agua “virgen”, más sulfuro de hidrógeno “virgen”. Se repite el proceso en la torre 2 y la torre 3 (aunque en ésta, el proceso con ácido sulfhídrico a  $130\text{ }^\circ\text{C}$  ocurre primero y el del agua a  $30\text{ }^\circ\text{C}$  después). De ésta sale agua pesada con una concentración (siempre con bastante DHO) entre 10 y 30%. Todas las torres de intercambio, operan a 20 atmósferas. De esta torre pasa a una columna de destilación que la concentra a un mínimo de 99,80% (requerido 99,75), aunque nosotros creemos haber llegado en simulaciones a 99,90%.

### ¿Cuáles eran los principales problemas?

- 1) Primero está la complejidad del proceso.
- 2) La mezcla reaccionante es altamente corrosiva y se deben usar aceros especiales (no conseguibles en la Argentina) en muchas partes de la planta. Se necesitan altos espesores por la corrosión del  $\text{SH}_2$  húmedo trabajando a 20 atmósferas y en partes a altas temperaturas. Íbamos a necesitar aleaciones especiales.
- 3) Casi todos los fluidos que se operan en la planta son explosivos, tóxicos e inflamables. Los operarios trabajan con el sistema de “two body movement” que significa que nadie se mueve en ella solo.
- 4) Nadie le va a querer vender  $\text{SH}_2$  a la Argentina. Seguramente, se nos venía encima un trabajo adicional.
- 5) Se trabaja como mínimo a 20 atmósferas y con temperaturas de  $130\text{ }^\circ\text{C}$ .

- 6) A 28,4 °C y 2000 kPascales y algunas dadas concentraciones, la mezcla de SH<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O forman un sólido y hay que destruir los equipos y cambiarlos por nuevos.
- 7) Seguramente se forman espumas en las torres que son necesarias para facilitar el intercambio de materia, pero pueden obturar todo.
- 8) Se debe operar con compresores especiales que nadie se los va a vender a la Argentina. Las especificaciones nos van a denunciar.
- 9) Las columnas de las plantas industriales tienen entre 90 y 100 m de alto y 9 m de diámetro). Las de la planta piloto podrán ser más angostas, y algo menos de altura, dependiendo de la opción final.
- 10) No tenemos datos ni de la termodinámica del proceso ni de todos los componentes en los rangos de operación.
- 11) Lo mismo ocurre en los datos cinéticos del intercambio isotópico, pero en este caso por información científica antigua, se conocía que el proceso podía ser rápido.
- 12) Prácticamente, y especialmente a partir de 1967, casi no existía bibliografía abierta de donde obtener información y la publicada anteriormente era extremadamente reducida y carente de datos concretos. Se conocía en forma general el procedimiento. Todo lo demás había que imaginarlo, deducirlo, producirlo y correr el riesgo. A partir de 1974 la situación empeoró aún más.
- 13) Con las fechas fijadas para la entrega de la ingeniería básica (del 02 de marzo de 1976 al 01 de marzo de 1978) no había tiempo para hacer ningún trabajo de laboratorio.
- 14) Todos sabíamos que no había formas de negociar plazos.
- 15) Todo se parecía a un gran festín para el Club de Londres.

Sobre el tema de los compresores y los materiales más adelante explicaré la solución al problema.

### *Anécdotas que acompañan el ejercicio de la vocación*

*Acerca del problema de los espesores, en la segunda etapa del proyecto (Ingeniería de Detalle), recibimos de una de las dos empresas que la estaba haciendo por algunos millones de dólares (su equivalente en pesos), la siguiente consulta por Télex: "¿El espesor por corrosión de las torres que figura marcado en la base de los planos de las torres (se trata de un círculo), se agrega al radio o al diámetro? Le contestamos: "Si lo suman al diámetro, multiplíqueno por dos". ¡Sin comentarios! Estuvo pegada en la oficina de Cerro por mucho tiempo.*

## **DESARROLLO DEL PROYECTO II**

Debe recordarse que en abril nosotros ya habíamos resuelto plantearle al Presidente de la CNEA un cambio en el programa, y que dicho cambio nos significó que en marzo de 1978 había que entregar la Ingeniería Básica de la P.M.E.A.P., la parte más original y complicada de nuestra tarea. También vale la pena señalar que en el período 02 de enero de 1976 a 02 de marzo de 1976, los más antiguos del grupo que todavía estaban en la Argentina (cuatro ya habían viajado a EE.UU. a hacer sus Ph. Ds. en ingeniería, plan que no se interrumpió en ningún momento) habían estudiado y en especial analizado críticamente, la poca documentación que existía sobre el proyecto. Ya desde antes, la gente de la CNEA había decidido en 1975 que lo único que se podía intentar hacer y como fuera posible, era el estudio de uno o varios (pocos) platos de transferencia isotópica por el proceso Girdler - Sulfide (G-S) que involucra el proceso SH<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O. Se trataba de un trozo de una columna de transferencia reactiva, a lo sumo, caracterizar la fisico-química del proceso y punto. A nuestro criterio no era necesario reducir la expectativa y viabilidad tecnológica a ese nivel tan pobre.

Luego de tres reuniones con nuestra gente, razonábamos de una forma distinta: (a) No había tiempo para hacer ningún trabajo experimental, (b) era más factible sobre lo poco que se conocía, intentar hacer nuestro desarrollo propio de algo similar al proceso G-S, utilizando algo muy nuevo que eran los métodos de simulación y diseño asistidos por computadora, (c) como primera etapa desarrollar nuestro propio simulador y (d) intentar convencer a la CNEA de desarrollar una planta completa. El mejor argumento, era el refuerzo recibido de los doce becarios del CONICET a quienes, ni bien terminaran el examen de ingreso e hiciéramos la selección de los mejores, los pondríamos a estudiar el diseño por computadoras, mientras que los más antiguos empezarían ya trabajando en lo que seguramente haría falta, a saber: termodinámica del proceso, lo que se pudiera hacer con la cinética, estimación de propiedades de los compuestos que seguramente estarían involucrados, modelos programados por computadora de diseños muy generales, flexibles y adaptables, de equipos que seguramente habría; tales como intercambiadores de calor, bombas, columnas de destilación, planta de tratamiento de las aguas de alimentación, etc. Esto podría llamarse ganar tiempo, mientras aprendíamos todo lo que ignorábamos y periódicamente se lo transmitiéramos a todos en clases especiales para el grupo.

Lo peor del problema es que no teníamos una computadora en Santa Fe. Inicialmente, por convenio (lo firmaba CONICET por nosotros) empezamos a trabajar con una muy pequeña computadora IBM 1030. Pertenecía a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Rosario. Pero era de capacidad muy reducida. Luego de algunos viajes y muchas negociaciones, logramos firmar otro convenio con la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, para usar la computadora que tenían en calle Colón. Podíamos trabajar de lunes a viernes de 22:00 a 06:30 horas. Viajaban en forma rotativa equipos de cuatro a diez personas en ómnibus.

### *Anécdotas que acompañan el ejercicio de la vocación*

*En una ocasión, la factura de hotel de uno de los ingenieros, incluía el lavado de ropa completo. Lo llamé y le pregunté cómo pensaba que iban a recibir en la CNEA esa factura, porque si bien el presupuesto era generoso, a mí no me parecía razonable mostrar abusos. Su respuesta fue: “De lunes a viernes no estoy en casa. El domingo que viene a la noche regreso a Bs. As. de nuevo. Este sábado a la mañana, cuando vine, le traje a mi esposa un marido que no durmió durante casi seis noches. ¿Te parece muy mal que como obsequio, le brinde la maleta de ropa lavada y planchada?”. Me tuve que callar y mandarle mis disculpas a su esposa. Hoy es un exitoso doctor de la Universidad de Florida, trabajando en el INTEC en la misma especialidad en que lo hizo en Agua Pesada (termodinámica). Había salido en 1979.*

*En otra ocasión, la factura del restaurante de un ingeniero registraba una langosta. Lo llamé y no pudo darme una explicación. Obviamente que esa factura no se rindió y de alguna forma se resolvió. Hoy es un muy destacado doctor, graduado en Wisconsin. Ésta es sólo una; fue el que más diabluras hizo durante los cinco años en que participó del proyecto, ya que en 1980 le tocaba salir para hacer su doctorado. Me consta que aún hoy conserva sus gustos por la buena comida. Trabajó en el INTEC hasta hace muy pocos años. Hoy lo hace de manera excelente en Buenos Aires; lógicamente mucho mejor remunerado y, curiosamente, lo vinieron a buscar sobre la base de sus antecedentes, de cuando la empresa que hizo las posteriores etapas del proceso de agua pesada interactuó con él (de los que buscaban, era el tercero de la lista; los otros dos están citados en este relato y no se trataba de Ramón).*

*Finalmente, en otro caso, la factura del restaurante de un ingeniero registraba una botella de vino de muy alto precio. Lo llamé. Le pregunté si esa era la marca de vino que tomaba*

*en su casa. Obtuve la lógica respuesta. Le sugerí dos cosas: (a) Que no repitiera la aventura y (b) me cambiara esa factura por otra del mismo valor, pero incluyendo más comida y postre (que no había) en lugar de la del vino caro. Lo hizo. También le sugerí que me invitara a cenar a su casa para disfrutar de un buen asado con ese vino. Lo hizo muchos años después. Hoy es un exitoso doctor de la Universidad de California (Santa Bárbara) trabajando en el INTEC. Había salido en 1978.*

Obviamente yo no revisaba la contabilidad. Los que la llevaban me advertían las rarezas.

Tiempo después, mi amistad con el Gerente General de una parte de FIAT (que en esa época estaba muy cerca de Santa Fe, en Santo Tomé) me permitió la firma de un convenio para usar la computadora de ellos de noche con un acuerdo que contemplaba tan solo algunas responsabilidades. Ya habíamos logrado comprarnos una Ford Falcon “familiar”. Sólo lo manejaba el chofer. Viajaban en total cinco personas desde las 21:30 a la 06:00. Todo mejoró un poco, pero...

### *Anécdotas que acompañan el ejercicio de la vocación*

*En el grupo de ingenieros, había dos que pertenecen al género femenino. Una con novio y la otra libre. En la ruta desde cualquier lugar de Santa Fe a la sede de FIAT, hay un conocido hotel alojamiento, que se denominaba MOTEL, y salvo otros sitios aislados, reducidos y bien arreglados, era el lugar de mejor “prestigio” en la zona. Las dos ingenieras viajaban siempre juntas, acompañadas de dos ingenieros. Estábamos en los años '70 y no en el Siglo XXI. Para evitar habladurías y pérdida de prestigio, al pasar por la zona del MOTEL que daba sobre el camino a Fiat, las ingenieras se agachaban a nivel del piso del auto, para no ser vistas. Pero esto no está vinculado con sus vocaciones ingenieriles.*

Finalmente a partir del segundo año empezaron los problemas con la compra de lo que sería nuestra pequeña Digital PDP-11 que desde 1974 nos la tenía prometida la Universidad. Compramos este modelo que era más usado para Control, para evitar los problemas que había en aquella época con la compra de Computadoras “normales” (la burocracia de siempre pedía unos increíbles estudios de factibilidad). Pero el Departamento de Estado de EE.UU. no permitía su exportación porque (según ellos) iba a ser usada en una Planta de Agua Pesada. (Creo que sus espías pensaron en un Control por medio de la PDP-11). Pedí una audiencia con el Agregado Cultural de la Embajada, que me la gestionó el Secretario de Castro Madero. Me dijo, muy amablemente, que esa computadora iba a ser “usada” en el control de la Planta de la CNEA que nosotros estábamos proyectando. A esto le dije que esa computadora era de la Universidad para cálculo. Él me preguntó: “¿Usted me da su palabra de que la Computadora no va a ser “usada” en la Planta de Agua Pesada?” Le contesté que sí. Que tenía mi palabra. “Que la compraba la Universidad con fines relacionados con nuestros trabajos”. Y era la verdad, porque sólo iba ser destinada entre otras cosas al “diseño” de la P.M.E.A.P. y no al “control” de la planta cuando estuviera montada. De inmediato, hizo autorizar la exportación. Hay que aprender que es fundamental formular bien las preguntas. Control de una planta montada no es lo mismo que su diseño.

Al año siguiente, con ahorros de los fondos que recibíamos de la CNEA en los cuales (con conocimiento del Presidente Castro Madero, habían previsto en el presupuesto que elaboraban ellos, un exceso que debía representar nuestras ganancias) compramos un Digital que nos costó quinientos mil dólares y no tuvimos más problemas por un breve tiempo (lástima que era una época en que todavía no se podían percibir honorarios como ahora con los Asesoramientos remunerados. Hubiéramos compensado las horas extras).

## **Estrategia de diseño**

Después de los análisis realizados entre junio y julio, Cerro volvió a insistir, en forma muy osada en que: (a) En forma tentativa, debíamos tratar de hacer todo el diseño por simulación por computadora. A esto agregué que de igual manera y en forma definitiva; (b) Ya sin dudas, debíamos tomar la decisión de olvidar la posibilidad de hacer experimentos. Ambas propuestas eran compatibles aunque excepcionalmente audaces y riesgosas. Pero no nos quedaban otras.

Ya en junio sabíamos que producto de nuestra ignorancia íbamos a tener que probar varias diferentes alternativas de arreglo del sistema de columnas (porque había dos compuestos que ambos podían operar en fase líquida o gaseosa en el intercambio y ello abría muchas posibilidades). Eso nos llevó con Cerro a fijar fines de octubre de 1976 como la fecha límite para tener terminada toda la “lógica” del programa de simulación o, de lo contrario, empezar a trabajar con ingeniería convencional. No se lo informamos a los demás para no preocuparlos inútilmente. Cabe mencionar que en ese momento había en el mundo un programa comercial y dos desarrollados y probados por universidades norteamericanas. El resto seguía intentando pruebas, como íbamos a empezar a hacer nosotros, aunque lo nuestro estaba reducido a los componentes involucrados en nuestros procesos y ningún otro. Pero la lógica (el corazón del sistema computacional) era en su esencia la misma. Con el tiempo, la gente del MIT empezó con el suyo que terminó siendo una formidable empresa que comercializa el ASPEN a costos muy altos, aunque con fines “académicos” (de los que muchos se abusan) es más económico.

Se decidió construir el PRO-S-PRO (PROgrama de Simulación de PROCesos o PROSPRO). La primera etapa era hacer que todos los ingenieros que trabajarían más tarde en la sección de intercambio isotópico, tenían que ocuparse primero de desarrollar el esquema de la lógica de operación de todo proceso que, en forma cualitativa y aproximada, ya habíamos logrado imaginarnos cómo podía ser (año 1976) obviamente con muchas incógnitas. De diez a doce empezaron con esta tarea. La necesidad de tener ayuda en la coordinación hizo que, del grupo completo eligiésemos a M. Chiovetta como Responsable de la “Lógica” del PROSPRO, habiendo notado que poseía las aptitudes para hacerlo. Con el tiempo cargó con la responsabilidad de las partes claves de la ingeniería, hasta que en el año 1979 le tocó su inevitable viaje a EE.UU. a hacer su Ph. D. en el mejor grupo de polímeros de dicho país.

En la primera semana de noviembre el PROSPRO funcionaba en todo lo que significaba las rutas de intercambio entre equipos posibles, involucrando todos los fenómenos que había en juego. Aunque parezca mentira, una de nuestras fuentes de información de cómo podía ser la planta, eran unas antiguas fotografías, previas al corte completo de la bibliografía actualizada.

## **Proyecto de equipos críticos y conocimiento de propiedades de los componentes del sistema**

Enseguida empezamos a entender lo que era fundamental abordar de inmediato e ir cargándolo cuanto antes en la lógica del PROSPRO que lo estaba esperando, a saber:

- 1) Aunque no técnico y parezca raro, lo incluyo ahora. Era necesario resolver el incordio que yo tenía frecuentemente con la SIDE.
- 2) Continuar con el desarrollo de toda la físico-química.
- 3) La clave era el sistema de columnas de intercambio isotópico. Sobre todo la óptima selección del arreglo de las fases del sistema que estaban en juego. Para el intercambio isotópico todos los arreglos entre fases gaseosas y líquidas, eran posibles y ello daba lugar a muchas admisibles combinaciones viables.
- 4) El sistema interno de intercambio de isótopos de las columnas.
- 5) La columna de destilación final.

- 6) Los posibles compresores.
- 7) El planteo del sistema de control asociado con las condiciones de confiabilidad y las redundancias.
- 8) Problemas asociados con materiales de construcción (la corrosión). Implicaba búsqueda de ayuda externa.
- 9) Cálculos de los costos estimativos.

## **1. Problemas con la SIDE**

Para ingresar a los organismos del Estado se debía sortear el filtro de la Secretaría de Inteligencia del Estado (SIDE). Una simple militancia política en la Universidad ya era un problema. A veces eran un poco más serios, pero rara vez de importancia. Yo tuve ocasión, por gentileza de un militar que estuvo en los primeros meses del Proceso en la Universidad (y después que él se convenció de que yo no era guerrillero) de ver mi ficha. Eran cuatro páginas de denuncias, la mayor parte de ellas falsas, producto de engaños, artimañas y chismes. Admitido por él; de lo contrario no me las hubiera mostrado.

Sobre esta base solicité la ayuda del entonces Capitán de Navío Castro Madero. El logró que nuestros pedidos de ingreso, pasaran TAMBIEN por la gente de la SIDE que trabajaba en la CNEA. Tuve doce casos con conflictos en la sede de la SIDE en Santa Fe. Sólo a dos no le dieron el visto bueno en Buenos Aires. Los otros diez (dos del sexo femenino, ingresaron). La única cláusula molesta era la necesidad de mi firma de aval en cada uno de ellos. Es decir, yo me hacía responsable. El CONICET aceptó esta forma de operación.

## **2. Sistema físico-químico**

Se armó un grupo de dos personas. Una con cuatro o cinco años de experiencia (pero no toda concentrada en este tema) y una muy joven. Se les definió la tarea, se acordaron las formas de interacción y se fijaron los plazos. Era equivalente al que se tenía para desarrollar el PROSPRO, al menos en una primera aproximación. Desde el punto de vista científico-básico era la clave del problema de intercambio, la llave para entender la posible simple cinética del intercambio y algunas suposiciones necesarias para poder interpretarlo. Obviamente que el problema de las fases perturbaba mucho los caminos que se exploraban.

## **3. Intercambio isotópico**

Habíamos encontrado siete alternativas posibles de plantear el intercambio isotópico de acuerdo a la forma en que se organizaran las fases que se podían hacer circular e intercambiar en las torres. No necesariamente debía ser intercambio de líquido con gas exclusivamente. Estaban todas las otras alternativas de intercambio que involucraran interacción entre dos fases de similar naturaleza química y con el cambio de las operaciones en contra-corriente de variadas formas. No se debe olvidar de que estábamos diseñando con ensayos que, en lugar de hacerse en el laboratorio, se hacían con simulaciones en la computadora. Sólo se podía desechar un resultado absurdo.

Del equipo original del PROSPRO, los problemas se asignaron a grupos de dos o tres ingenieros cada uno. Una vez cada dos semanas se hacía la reunión de intercambio de información. Una alternativa comenzaba a aparecer como más probable. Luego del plazo de trabajo fijado, se resolvió optar por otra (lo que es normal). Uno de los diez miembros comentó que él sabía de entrada que la que parecía más factible, partía de un error, y era cierto. Y ocurrió que la de su grupo fue la que se terminó eligiendo. No dije una palabra. Al terminar la reunión cité a este investigador (muy inteligente sin duda, pero también bromista) a mi oficina y le advertí que si se repetía otra vez un acto de egoísmo como el suyo, que había

perjudicado a otras nueve personas, como mínimo iba ser separado del proyecto. Lo ocurrido en la reunión fue pronto de conocimiento de muchos y sirvió de preaviso para todos.

Efectivamente, la propuesta de este investigador terminó siendo la elegida. Fue cargada con toda la información posible y el Simulador parecía indicar que era factible la operación de esa manera. A partir de ese momento se inició con el PROSPRO el diseño preciso de la operación de la sección de intercambio isotópico, recurriendo a uno solo de los siete “modelos” posibles. Vale la pena comentar que el diseño de las columnas (que fueron tres de intercambio) terminó con equipos de 60/65 m de alto y la más grande en cuanto a caudal, 2,5 m de diámetro.

#### 4. Internos de las columnas

En esto llevábamos una gran ventaja. Ya existían los rellenos ordenados como podemos ver en la Fig. 10. Había inconvenientes a solucionar con los materiales. Una persona del grupo fue asignada a estudiar su diseño y/o forma de adopción. Acá era fundamental dilucidar el problema de las espumas. Se resolvió con cálculos físico-químicos hechos por computadora.

De la misma manera que la forma de evitar el pasaje de las corrientes de las columnas por la zona crítica de temperatura, presión y concentraciones (formación de fase sólida). El problema del material no fue responsabilidad de él.

#### 5. Diseño de la columna de destilación

Se asignó la tarea a una persona del grupo de los más experimentados, con la asistencia de los físico-químicos. En nuestro caso, la columna de destilación, como resultado de los intercambios isotópicos, partía de una concentración de 10% de  $D_2O$  y terminaba con 99,80%. Era la más delgada de todas (el mínimo compatible con su estabilidad) y con una altura similar a las otras. Ya veremos que la asignación de menor importancia a este equipo (porque así lo parecía) nos trajo un dolor de cabeza. No siempre la presencia de causas pequeñas trae consecuencias pequeñas. No cualquier columna iba a aceptar trabajar bien con dos compuestos tan parecidos, partiendo de una baja concentración de la alimentación de  $D_2O$ . Pero los resultados mostraban que el intercambio de esa forma parecía funcionar muy bien y con confiables márgenes de tolerancia y resolvimos pasarle el problema de la necesaria concentración final a la columna de destilación. En ingeniería química, con buenas

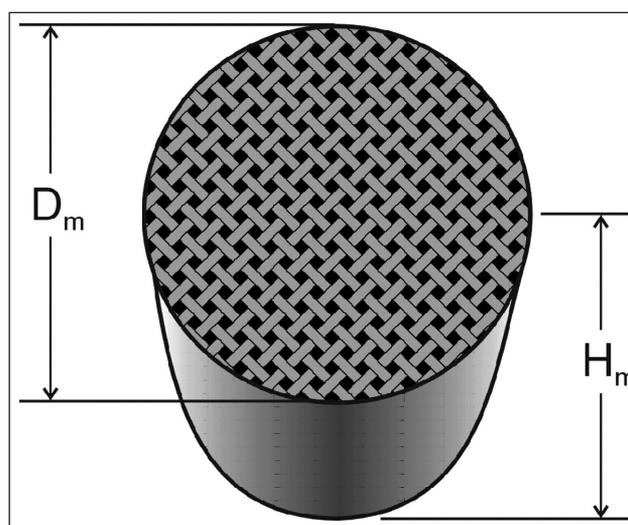


Figura 10. Internos de las columnas – Rellenos ordenados

computadoras no podía ser algo grave. Pero a veces, la físico-química le impone condiciones a las operaciones unitarias, por muchas posibilidades de cálculo que hayamos tenido. Fue necesario procesarla totalmente de nuevo y en tiempo extra-cronograma.

## **7. Compresores**

Estos equipos sólo se podían terminar de especificar y comprar, en el momento en que la Ingeniería de Detalle hubiera avanzado en el progreso de algunos aspectos que los involucraba. A fines de 1979 la CNEA nos comisionó para que nos ocupáramos de conseguir que alguien nos vendiera los compresores que necesitaba el proceso.

En casos como estos, los equipos se compran sobre la base de especificaciones muy concretas. Disimulando nuestras necesidades, como si se tratara de una planta que usaría cloruro de hidrógeno húmedo y dando las condiciones de caudal, presión, temperatura y régimen de operación, pedimos cotizaciones a dos empresas de EE.UU. y otra igual de Inglaterra. Recibimos aproximadamente siempre la siguiente respuesta: “Lo lamentamos mucho, pero no podemos cotizar. Especificaciones muy parecidas a las vuestras se emplean en compresores de fábricas de agua pesada, y nuestro país tiene restringida este tipo de ventas a la Argentina”.

Finalmente, logramos que una empresa francesa, aceptara recibirnos en diciembre de 1979. El diseño estaba completo; bastaba que quisieran vender. Sabían de qué se trataba. Viajé con Chiovetta y el experto de nuestro grupo en los compresores. Cuando llegamos, en el frente de la empresa había una bandera Argentina. Buenos augurios.

Luego de analizar el problema, se llevaron las especificaciones y pidieron setenta y dos horas para traer la cotización con las especificaciones citadas de lo que podían proveer. Regresaron dos días después con la carpeta con todo lo prometido.

Nosotros habíamos llevado una mínima calculadora de mano que admitía pequeños programas de cálculo con tarjetas (Eran H-P). En una de estas tarjetas teníamos el cálculo simplificado de los compresores. Pedimos un par de horas para verificar y fue aceptado. Cuando regresamos les dijimos a los tres amables franceses que habían hecho mal los cálculos y los compresores de ellos no cumplían con nuestras especificaciones. Se mostraron preocupados pero sonrientes y ahora ellos pidieron una hora. Regresaron y sus palabras fueron: “Tienen razón. Estamos equivocados. Por lo menos una cabeza va a rodar mañana. Les pedimos que a costo nuestro, se queden una semana en París, a esperar nuestra nueva oferta”. Previa conversación telefónica con Cerro, acepté.

### *Anécdotas que acompañan el ejercicio de la vocación*

*Nosotros de día recorrimos París y de noche también, con la excepción de que el experto en compresores, una noche por medio quería descansar. Una de ellas el Jefe del Área de Compresores de la Empresa Francesa nos invitó a cenar al restaurante de la Torre Eiffel. Cuando nos sentamos pidió una botella de Champagne (auténtica) y propuso un brindis por el Presidente Carter de EE.UU. que les permitía hacer negocios a los franceses. Luego nos dijo que tenía instrucciones de obsequiarnos a cada uno un velador de la mesa (con la Torre). De inmediato les respondí en nombre de los tres (antes que alguno se equivocara) que le agradecíamos, pero no podíamos aceptarlo (tuvo muy en claro que no se podían recibir obsequios durante un proceso de compra que involucrara un grupo como nosotros) por un problema de ética de nuestra institución de la que me ocupé de aclararle que yo era el fundador. De cualquier manera, cuando salimos del restaurante, debajo del chaleco de lana que tenía bajo su saco extrajo un plato del negocio que tenía grabada la torre y me lo obsequió. Había entendido el mensaje y procedió en consecuencia.*

A la semana siguiente verificamos todo y ahora estaba bien. Prometieron que por correo certificado y urgente recibiríamos la oferta completa con todos los planos. Les advertimos que (de conformidad al acuerdo previo entre ambas empresas argentinas, alcanzado previo al viaje) toda la transacción se debía hacer completamente a nombre de YPF por razones de seguridad, luego la gente de la CNEA compró otro juego de compresores idénticos (concepto de redundancia en equipos críticos) en Alemania. Las facturaciones a nombre de YPF no lo habíamos aprendido en los libros de ingeniería, pero nos daba ciertas seguridades en lo que respecta a evitar las interferencias de nuestros amigos integrantes del Club de Londres que no fueran tan “libres” como los franceses. Los alemanes no lo integraban ya que habían perdido la guerra. Nuestro experto en compresores a su turno fue a hacer su Ph. D. a la Universidad de Minnesota y está de regreso en el Instituto.

## **7. Problemas asociados con materiales**

La corrosión del acero por el sulfuro de hidrógeno húmedo y a alta presión es gravísima y responsable de posibles explosiones, incendios e intoxicaciones. (La planta tiene que tener una antorcha contra incendios como las petroquímicas o equivalentes y análogos sistemas contra protección de siniestros). Casi todos los países se negaban a vendernos los aceros que necesitábamos. Afortunadamente, la CNEA era en esa época la Institución con mejor capacidad humana en materia de materiales. Fue sencillo encontrar las personas aptas y hacerles un contrato por la especificación de todos los materiales que necesitaba la planta. Eran pocos, pero las dichas especificaciones tenían que ser tales que: a) Fueran útiles para nosotros y b) pudieran ser provistos por alguno que no estuviera controlado por el Club de Londres o alternativamente, susceptible de ser fabricado bajo control, por algún grupo especial en la Argentina. Se resolvió de esa forma.

## **8. Planteo del problema de control**

Al promediar diciembre de 1976 se nos planteó el problema del armado del grupo de Control para la planta. Hicimos un llamado a concurso. Se presentó una persona con un excelente C.V. aparentemente formada en México. Pretendíamos que nos presentara en forma genérica, en cuatro meses, su plan y nos hiciera una exposición de cómo pensaba implementarlo para proveerle ayuda de la especialidad que necesitara. A los seis meses no había formulado nada concreto. Comenzamos a sospechar. Sin entrar en detalles, simplemente lo separamos del grupo de Agua Pesada y cuatro años después por los procedimientos del Estatuto, logramos su separación del CONICET, donde con los antecedentes que exhibía había ingresado como Investigador Independiente. Su C.V. era en su mayor parte fraguado.

Estábamos en problemas. Por donde se quiera buscar, la fortuna u otros orígenes, vinieron en nuestra ayuda.

Un Ing. Qco. graduado en la U.B.A. con un Master en polímeros y un Ph. D. en CONTROL, graduado en Inglaterra, apareció de sorpresa. Nos relató que su familia por el lado de la esposa vivía en Rosario, le comentó acerca de un grupo de Santa Fe que parecía estar trabajando en algo importante. Había sido mandado cinco años antes por Y.C.F. a hacer el doctorado con una beca de ellos. Cuando regresó, las nuevas autoridades le dijeron, que no existía interés en Y.C.F. por lo que él hacía y que si encontraba una institución de dependencia nacional, le transferirían sus obligaciones (por la beca).

El CONICET procedió muy bien con él (retorno del exterior) y pronto empezó a armar un grupito de control. Nos advirtió que al 1° de marzo de 1978 no llegaba. Iba a necesitar para completar la Ingeniería Básica del control tres meses más. Negociamos con la CNEA licitar en control en un llamado seis meses después. Nos vino muy bien, porque más tarde,

el INVAP que recién comenzaba a levantar vuelo, pudo ser contratado en forma directa por el Estado para la Ingeniería de Detalle y todo el resto.

### *Anécdotas que acompañan el ejercicio de la vocación*

*Cuando su suegro le informó al futuro encargado del control (Dr. G. Meira) de la existencia del proyecto del INTEC, me llamó por teléfono a mi oficina el mismo día. Para no variar mis hábitos eran las 22 horas. Le pregunté cuánto demoraba en venir a Santa Fe con sus antecedentes en la mano. Me pidió cuatro días a lo sumo. Una semana después de la entrevista, tuvo un contrato con fondos propios (provenientes de la CNEA) hasta que logramos su ingreso al CONICET como un argentino que volvía al país. En seis meses, sin burocracia, el problema se solucionó. Además de resolvernos nuestra emergencia; vale la pena comentar que ya hace un tiempo es Investigador Superior en el Instituto.*

## **9. Cálculo de costos estimativos**

Fue uno de los trabajos más difíciles y donde la falta de experiencia se hizo notar. Una persona estuvo trabajando un año en el tema, visitando empresas. Nunca tuvo mucho éxito. Las empresas tienden a no suministrar costos de equipos que se presupuestan sobre la base de los planos del diseño y los materiales de construcción específicos y le disparan a la competencia.

Logramos hacer algunas estimaciones y verificar que las publicaciones que hay en EE.UU., dando esa información, se basan en datos estadísticos acumulados que estiman los especialistas y basados sobre todo en la estabilidad de los costos, con variables temporales que ellos saben cómo extrapolar.

### *Anécdotas que acompañan el ejercicio de la vocación*

*Lo que sí aprendimos es que nuestro ingeniero, después de recorrer muchas empresas, recibió una excelente oferta y se nos fue a la industria privada. Tenía muchas cualidades naturales para el manejo de las relaciones personales y por eso lo habíamos elegido ahora para esta tarea y lo perdimos. En la actividad privada fue excepcionalmente exitoso, llegando a ser el Gerente General del área latinoamericana y no siguió más arriba porque la familia no se quiso ir a vivir en EE.UU.*

El resto del equipamiento era casi convencional y no vale la pena que entremos en esos detalles. Acá lo importante es que los compresores y las cuatro columnas, en el circuito que teníamos, indicaran en el simulador que estaban produciendo el agua pesada de la concentración deseada **A PESAR DE QUE NO HABÍAMOS HECHO NINGÚN EXPERIMENTO Y TRABAJAMOS EN CASI TODOS LOS CASOS CON PREDICCIONES TEÓRICAS. ESTO CONFIRMÓ QUE NO EXISTE MEJOR PRÁCTICA QUE EL CORRECTO MANEJO DE LA TEORÍA.**

## **DESARROLLO DEL PROYECTO PARTE III**

Abrumado por sus otras tareas, al comenzar el año 1977 Castro Madero reservó para sí las decisiones más importantes y (previa entrega de su teléfono directo y conversación en conjunto con su secretario privado) designó para hacer el seguimiento de detalle, aun Jefe de Proyecto “dentro de la propia CNEA”, para que fuera nuestro contacto permanente. Luego de un breve interregno del Dr. Maimó que duró muy poco, la designación recayó en el Doctor en Física y Capitán de Fragata Amilcar Funes. Era una persona muy amable,

culto, algo temeroso y no muy optimista. En el fondo, no nos conocía y vivía planteándonos dudas.

Entre otras cosas, quería hacer valer su autoridad sobre el Ing. Aníbal Núñez, que del proyecto conocía mucho más que él. Era lógico, no sabía Ingeniería Química y en los hechos su vocación había sido la especialidad máquinas en los barcos de la Marina, pero no sólo opinaba en cuestiones mayores, porque en realidad le gustaba hacerlo con todas, lo que en muchos casos provocaba la diversión de la gente joven del grupo del INTEC que detectaba las intervenciones erróneas.

Por ejemplo, viajó a Rumania pagado por la CNEA para visitar un emprendimiento que estaban iniciando de una planta de agua pesada. A su regreso no pudo evitar que se crearan “las rumanías de Funes” cada vez que opinaba.

Luego de un tiempo, y antes de comenzar con el diseño de la Ingeniería Básica ya completa, el Dr. Funes, preocupado por los costos que ya se vislumbraban e impulsado por su temperamento, convenció a Castro Madero de reducir el tamaño de la planta a una de las más pequeñas de las opciones: 2,5 toneladas por año. Esto representó un cierto disgusto para el Presidente, pero su responsabilidad estaba detrás de la decisión; y pienso que temió por un conflicto por “el mal uso de los fondos públicos”. Lo mismo ocurrió con algunos de los integrantes de nuestro grupo, en que la noticia constituyó un revés anímico importante. Nosotros los convencimos de que para el PROSPRO significaba tan sólo el trabajo adicional de un poco más de una semana y mostraba el valor de nuestro procedimiento. Este aspecto también tranquilizó mucho a la gente de la CNEA que justipreció la forma en que habíamos trabajado en el diseño por computadora. Ramón Cerro y yo sólo pensamos en que en el fondo eso representaba una reducción en el tamaño final de la obra y tal vez lo tomamos como una agresión a nuestro orgullo.

En esa instancia se la comenzó a denominar, por idea del Dr. Funes, “Planta Modelo Experimental de Agua Pesada” (P.M.E.A.P.). Lo que Funes no terminaba de entender es que ese cambio no iba a ser tan significativo para los costos, por razones de diseño y exigencia de las redundancias típicas de las industrias de riesgo. Lo único que cambiaba eran los equipos grandes; el resto iba a ser casi todo igual. Por ejemplo, el Control sería el mismo. Los sistemas de seguridad, igual. Pero algo de lo que afirmaba era cierto. Además el Dr. Funes planteó la necesidad de que el proyecto contemplara variantes para poder estudiar más de una de las alternativas que oportunamente habíamos considerado posibles en el proceso. Y esto en los hechos significó un aumento en los costos de forma relevante. A nosotros nos cambiaba un poco el trabajo, pero el hecho lo hicimos notar en los presupuestos subsiguientes.

Cuatro meses antes de la entrega de la Ingeniería Básica nos encontramos con: 1) un problema en un diseño, 2) una faltante en el Programa Completo que habíamos elaborado entre la gente del área de reactores de la CNEA (Ings. Cosentino y A. Núñez) y nosotros y 3) el atraso ya relatado en el problema de control. El primero fue un error en el cálculo de la columna de destilación, el segundo era el olvido de haber incluido el Análisis de Fallas en la Ingeniería Básica, como parte del diseño por tratarse de una planta de alto riesgo y el 3) afortunadamente ya tenía un cambio de fecha y solución prevista y acordada.

Pedimos que mientras preparaban el llamado a licitación con la información que ya tenían, el problema de destilación se dejara abierto para cambiarlo en un plazo inferior a tres meses, cosa que no dificultaba los tiempos que ellos tenían con todo lo que representaba preparar este llamado para que una o más empresas en consorcio, tomaran a su cargo lo que faltaba del proyecto.

Cabe recordar que esto era así ya que nosotros (salvo los Manuales de Operación y, al final, la Puesta en Marcha y entrenamiento de personal) sólo teníamos por contrato, la obligación de **supervisar** todas las tareas que se iban a ejecutar como consecuencia del llamado a concurso. De entrada no quisimos involucrarnos en aspectos convencionales o tener que

armar un equipo de treinta tableros para hacer la Ingeniería de Detalle. Algo similar ocurría con el Montaje. Se retomaba con mucha relevancia nuestra intervención, en la Puesta Marcha.

En tres meses se entregó la documentación faltante de la columna. El resultado del Análisis de Fallas que entre otras cosas, iba a definir las redundancias necesarias (equipos que, salvo los mayores tienen que tener el reemplazo ya seguro en stock para cambio inmediato) se iba a resolver como primera prioridad. El caso de los compresores ya había sido previsto con la compra, en su debido momento, de dos juegos. Caían dentro del grupo de los equipos grandes, pero no se podía correr ninguna aventura e inseguridad en un problema con ellos, dada la dificultad que existía para adquirirlos. Se resolvió que todo lo que el Análisis de Fallas pudiera afectar a la Ingeniería de Detalle sería motivo de un eventual llamado a licitación “complementario”. Al entregar la Ingeniería Básica y disponer nosotros ya de un cierto excedente en los ingenieros de diseño (los futuros investigadores), la tarea se pudo hacer de manera muy rápida y el problema no trajo ningún inconveniente.

Como se describió en el punto Desarrollo del Proyecto II, el problema de la Ingeniería de Detalle del Control tuvo una solución óptima por la vía de la contratación directa del INVAP por parte de la CNEA.

El 1° de marzo de 1978 entregamos todo nuestro trabajo, salvo el esquema de control, el detalle de la columna de destilación y el análisis de fallas antes citado.

En 1979, previo análisis nuestro, se adjudicó la licitación para la realización de las etapas 2, 3, y 4 antes citadas en los Objetivos.

Poco tiempo más tarde, sin que constituyera una sorpresa porque lo teníamos registrado como un problema probable a futuro, nos encargaron el desarrollo de la Ingeniería Básica de una planta de producción del Sulfuro de Hidrógeno necesario, por temor a no poderlo comprar en el exterior y se agregó este compromiso en un nuevo Convenio y obviamente un presupuesto adicional. Con la lógica del PROSPRO se armó el programa de cálculo de esta Planta, donde la gran mayoría de la información existía y con algunas excepciones, la mayor tarea fue la búsqueda de los datos primordiales que se encontraban en la bibliografía. Pero la gente ya tenía la capacidad y experiencia necesaria para hacer esto y no les resultó un gran desafío.

A partir de allí, lo que seguía era cuestión de proceder con los excelentes investigadores, ingenieros y matemáticos que habíamos formado (pero muy especialmente un grupo muy calificado de Personal de Apoyo profesional) a cumplir con las tareas de supervisión, sin bajar ni la excelencia ni el ritmo de trabajo. Por otra parte, el grupo profesional-técnico (Personal de Apoyo) dedicado exclusivamente al proyecto (sin contar otras formas de apoyo en los aspectos contables y administrativos o nuestro banco de dactilógrafas) ya lo formaban más de 30 personas y eran una excelente garantía de seguridad para los que se hicieron responsables del diseño.

Estos últimos, eran los que serían en el futuro, fundamentalmente por la forma de reclutamiento, casi todos investigadores. Habían ingresado como becarios, pero para trabajar en una tarea de desarrollo en equipo, con nuestro compromiso de que, con un cronograma preestablecido, viajarían al exterior a hacer un Ph. D. que, por lo menos hasta hoy, supone la realización de una tarea original individual, con el apoyo exclusivo de su Director de tesis.

En 1979/81, tuvimos la desagradable tarea, a pedido de la CNEA, de participar en el estudio de la propuesta hecha por una empresa extranjera, para construir una Planta de Agua Pesada en Arroyito, que hoy ya existe y es una de las más, si no la más preciada del mundo. Usa el intercambio isotópico amoníaco-agua. Al crearlo, no hicimos otra cosa que cumplir con nuestro compromiso tomado el día que firmamos el contrato por la Planta Completa nuestra. Si fruto de nuestra tarea, se abrían las ofertas externas de plantas de agua pesada, la CNEA iba a continuar con la misma (tal como lo hizo) pero sin esperarnos para construir la Planta

Industrial. Tan bien nos había ido en nuestro trabajo de desarrollo hecho casi a ciegas, que tuvimos que colaborar en la citada tarea que, sin embargo, nos resultó poco atractiva. La licitación de esta planta se hizo todavía en época de Castro Madero y fue adjudicada.

## **NO TODO FUE DIVERSIÓN**

Desde 1975, cuando un profesor de valor era echado de la Facultad y lo quería contratar el INTEC o, si un becario quería ingresar al CONICET, tenía “problemas” con el informe de la SIDE. A partir de 1976, luego de una consulta con Castro Madero (que me informaba si esa persona tenía acusaciones serias o puras sospechas o alcahueterías) haciéndome responsable con mi firma, el CONICET lo tomaba. Solo fracasé dos veces y por tonterías. El Rector lo sabía; no le gustaba, pero estaba al tanto del procedimiento que usaba y respetaba mucho al Presidente de la CNEA.

En 1980 tuve el incidente más serio de los más de cincuenta y dos años de actividad que llevo en mi profesión. Dos médicos nacionalistas, militaristas, Investigadores Superiores del CONICET, me denunciaron por escrito, ante el General Videla. La acusación era la de ser un Montonero disfrazado porque tomaba en el INTEC profesores que habían sido expulsados de la Universidad; porque ayudaba a salir del país a personas “indeseables” para poder hacer doctorados afuera (eran aquellos que no lograba que ingresaran al INTEC pensando que luego retornarían) y porque estaba “sovietizando” (sic) el INTEC y el CERIDE (porque cada uno de ellos tenía Consejos Asesores que en los hechos actuaban como directivos). Curiosamente, el Consejo Asesor del CERIDE estaba formado por los Directores de Institutos y de Programas. El del INTEC con un formato donde la gran mayoría eran investigadores.

La denuncia fue girada por el Presidente de la Nación al Secretario de Ciencia y Tecnología, el Dr. F. García Marcos, quien me citó de inmediato por Télex. Cuando concurrí (lo conocía por las gestiones relacionadas con el crédito del BID) me mostró la carta y me dijo sólo tres cosas: “¿Qué me puede decir de esto?”, “A usted me voy a ver obligado a echarlo” y “¿Tiene su pasaporte al día?” Luego del dialogo, mi respuesta fue: “Si tiene tiempo, consulte primero con el Vicealmirante Castro Madero y después volvemos a hablar”; cosa que aceptó.

Una semana después, me volvió a llamar y me dijo: “Olvídese del tema, está todo aclarado”.

Yo no lo puedo asegurar, pero por los términos de la denuncia que pude leer en todo su contenido, seguramente Castro Madero me evitó unos posibles años de cárcel y, por qué no, tal vez me salvó la vida. También me sirvió para reflexionar. ¿Qué pasaba si una persona no tenía la fortuna de que alguien con influencia lo defendiera? Obviamente, el tiempo nos dio a todos las respuestas. En ese momento, salvo lo relatado, la única mejor salida era irme del país.

## **LA LABOR DEL INGAR**

En septiembre de 1980, alrededor de treinta de los integrantes del proyecto (el Dr. Cerro, cuatro futuros investigadores y el resto Personal de Apoyo) pasaron a constituir el INGAR, que desde el 1° de abril de 1981 asumió la continuación del plan con la CNEA hasta su finalización que estaba programada para 1984. Todos los integrantes provenían del INTEC y eran en esos momentos, la fracción más importante del grupo mejor capacitado en el diseño de ingeniería básica de procesos del país.

Al INGAR, al menos yo, lo pensé como el equivalente a una empresa (por esto su dependencia original exclusiva de una fundación) para hacer trabajos de desarrollo y poder tener libertad de contratación en concursos de precios de cualquier índole relacionada con la ingeniería de procesos químicos. De allí el gran número de Profesionales de Apoyo que tenía. Con el tiempo se cambió la idea y pasó a ser un instituto más del CONICET, con

toma de becarios y formación de investigadores aunque, al menos inicialmente, sin tareas de laboratorio. De cualquier manera, cumplió con todas las obligaciones que le habían sido transferidas por el INTEC que, en cambio, en el mismo año comenzaba con unos de sus principales planes originarios de su creación: el Doctorado en Ingeniería Química. Ya el flujo de retorno de los Ph. D. formados se había empezado a volver importante y teníamos el necesario recurso humano para hacer las cosas seriamente. Por eso, con su ya numeroso grupo de doctores en Ingeniería Química, el INTEC se concentró en poner en marcha efectiva el primer doctorado formal en ingeniería en la historia del país (1980/1981).

El INGAR, dirigido por R. Cerro, a partir de abril de 1981 tomó el control total de la continuación del proyecto de la PMEAP, que se terminó casi cuatro años después. Eso le representó adoptar una estructura de organización muy atípica. En primer lugar, para ser más expeditivo en los procesos de transferencia de tecnología, como se menciona más arriba, dependía de una fundación privada (la Fundación ARCIEN que había sido creada por nosotros en el año 1976 cuando todos pertenecíamos al INTEC) y tenía un convenio de cooperación con el CONICET. Esta forma organizativa le dio gran flexibilidad de operación. Por otro lado, y es importante hacerlo notar, se encontró con un imprevisto inconveniente muy serio: a partir del año 1983, tuvo que lidiar con la muy clara pérdida de énfasis que sufrió el Plan Nuclear por parte del gobierno recientemente electo. Procurando evitar todo tipo de conflictos, muy especialmente en la parte presupuestaria de lo que se estaba terminando de construir y se debían hacer ensayos de puesta en marcha, siguió adelante con los planes. Y de esa forma, alcanzó los objetivos previstos. En la Fig. 11 se ve la planta en construcción y en la Fig. 12 vemos la PMEAP ya inaugurada.



Figura 11. PMEAP en construcción

Pero además, tenía que realizar tareas que representaban no sólo el control de toda la actividad que llevaba a cabo el consorcio Astra Capsa - Evangelista S.A. que había ganado la licitación (que como se sabe, consistía en la supervisión de la Ingeniería de Detalle, Construcción y Montaje y Puesta en Marcha de la Planta) sino que, en el último año, capacitó al personal de la CNEA para la operación de la fábrica de agua pesada. Esto se hizo sobre la base de Manuales de Operación que se habían empezado a elaborar en el año 1980 por dos becarias que luego permanecieron en el INTEC. La tarea compleja y también aburrida, se continuó una vez que fue asumida en su totalidad por personal del INGAR.

Pero por otra parte, el citado Instituto, para asegurar el éxito del proyecto, creó y fortaleció nuevas líneas de trabajo que sólo en esa época se practicaban fundamentalmente en la industria nuclear. A las que ya habían transformado en sus mayores especialidades (la Simulación de Procesos y el Diseño Asistido por Computadoras) agregaron nuevas líneas de capacitación y perfeccionamiento con el Análisis de Fallas (ya aplicado) y la Ingeniería de Confiabilidad que caracterizaron su accionar muy particular en los años siguientes.

En ningún caso perdió en la mayor parte de su accionar, la excelencia y el hábito de cumplir cronogramas y lo preservaron sin hesitar con su crecimiento posterior.

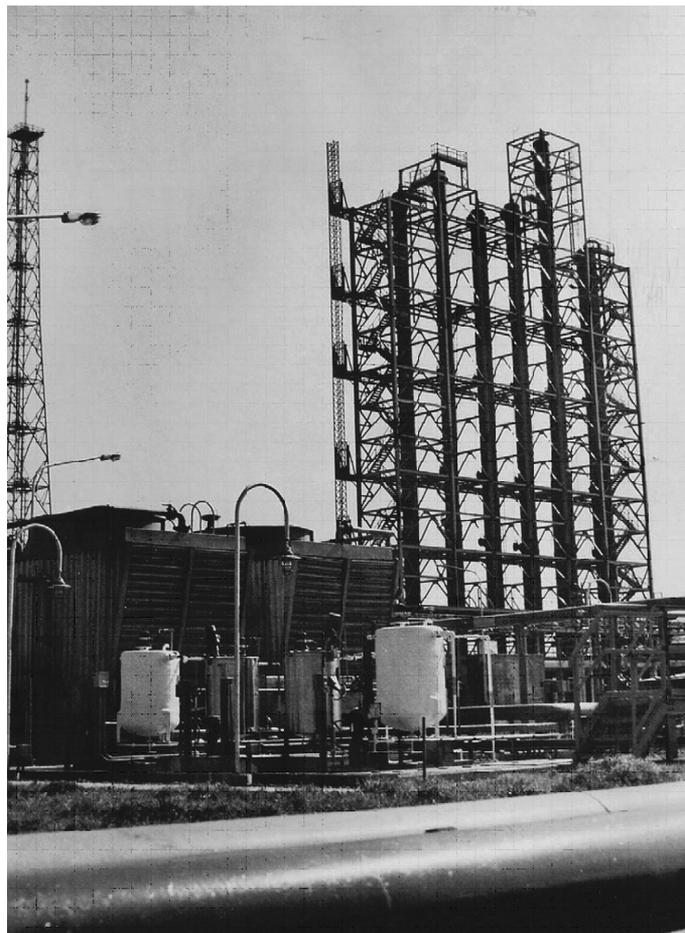


Figura 12. Modelo de la PMEAP terminada

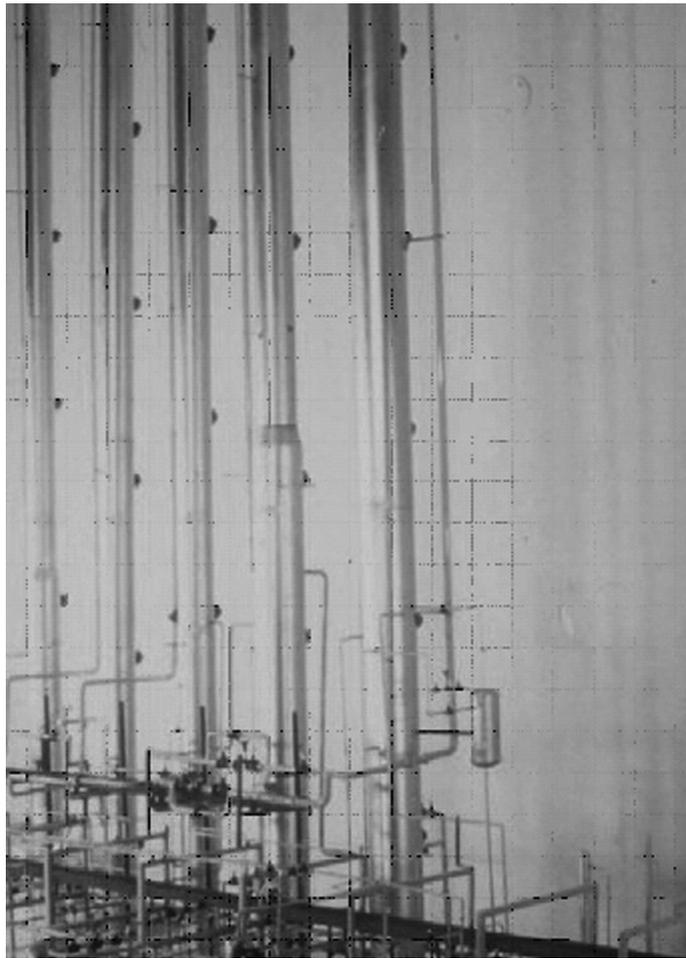


Figura 13. Modelo de la PMEAP en escala

## **EL FINAL MÁS TRISTE PARA TODOS**

Como lo relaté en una oportunidad en los diarios y en especial en el vespertino local, El Litoral, al INGAR también le tocó la tarea más triste de todas.

Fruto de presiones del gobierno de los EE.UU., como parte de las negociaciones con el FMI, de las autoridades electas en 1989, entre 1991 y 1994, el INGAR fue contratado por la CNEA para asesorar en el desmantelamiento (desguace) de la PM.E.A.P, procurando que esta increíble decisión se hiciera con la menor pérdida económica posible. La PM.E.A.P sufrió el mismo proceso que el plan cordobés de aeronáutica. Para nosotros, debo confesarlo, fue el mejor indicio de que habíamos hecho una excelente obra y, el principal miembro del Club de Londres, aplicó toda su potencia para romper lo que no había logrado hacer mientras trabajábamos nosotros con el INGAR.

“Al finalizar la década del 90, del esfuerzo comenzado con tanto entusiasmo en 1975, ya no existían rastros y sólo quedaron los recuerdos de una excepcional aventura con toda certeza exitosa, en el campo del desarrollo de tecnología autónoma, realizado por un conjunto de personas que, en promedio, apenas superaban los treinta años de edad”.

## **INTERACCIONES ENTRE CIENCIA E INDUSTRIA PARA EL DESARROLLO DE PRODUCTOS**

*Alfredo Calvelo*

e-mail: alfredocalvelo@gmail.com

Miembro de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

### **Resumen**

Se describen las características y modalidades de trabajo para el desarrollo en empresas alimentarias elaboradoras de productos de consumo masivo, así como en grupos de investigación y desarrollo estatales.

Al efecto, se esquematizan las interacciones entre la investigación científica y el desarrollo tecnológico a través de un circuito de generación de conocimientos público coexistente con un circuito privado de acceso restringido que aporta elementos de exclusividad a los desarrollos del sector productivo.

Se detalla la fuerte interacción con el mercado que tiene el proceso de desarrollo en la industria alimentaria y los condicionamientos que ello impone a la metodología de trabajo para el lanzamiento de nuevos productos.

Paralelamente, también se describen las modalidades de vinculación de los grupos de investigación y desarrollo con el sector productivo, destacando algunos elementos faltantes que conspiran contra una fluida interacción entre ambos sectores.

Así, por carecer de una estructura de marketing, es raro que los grupos de I y D incluyan en sus desarrollos condicionamientos del mercado, por lo que solo podrán desarrollar integralmente productos para mercados no competitivos. Por el contrario, si se pretende éxito comercial en productos dirigidos a mercados competitivos, será fundamental la interacción con el sector productivo para que aporte al desarrollo los elementos condicionantes provenientes del mercado.

*Palabras Claves: Ciencia, Industria, Desarrollo*

### **SCIENCE AND INDUSTRY INTERACTIONS FOR PRODUCT DEVELOPMENT**

#### **Abstract**

The characteristics and work modalities for product development in food companies which elaborate retail products, as well as in research and development groups belonging to the state are described.

Scientific research and technological development interaction are described in terms of a public circuit for knowledge generation, coexisting with a restricted access private circuit which provides exclusivity elements to the industrial developments.

The strong market interaction involved in the food industry development process and how it imposes restrictions to the methodology for launching new products are detailed.

In parallel, the research and development group relationship with the industry is analyzed, emphasizing some lacking elements which hinder a free flow of technology between them.

Thus, due to the absence of a marketing structure, it will be unusual that R & D groups include market restrictions in their product developments, which will be only suitable for non competitive markets.

On the other hand, if successful commercial products are desired, it will be necessary a deep interaction with the production companies, in order to incorporate in product developments the restriction elements coming from the market.

*Key words: Science, Industry, Development*

## INTRODUCCIÓN

Las relaciones entre ciencia e industria han sido analizadas en nuestro país desde la década del 60 y a través de numerosos enfoques: ideológico, político, social, comercial, estratégico, etc.

Este artículo pretende analizar las interacciones más comunes entre los Grupos de Investigación y Desarrollo del Estado con el Sector Productivo en el caso especial del desarrollo de productos y destacar algunos elementos faltantes que conspiran para una fluida interacción.

Si bien el análisis está restringido al desarrollo de productos de consumo masivo en la industria alimentaria y excluye las Empresas chicas carentes de una estructura de marketing y de laboratorios de desarrollo, es muy probable que algunos conceptos sean también extensibles a otros sectores de la industria manufacturera.

### 1. Definiciones

El tratamiento del tema requiere establecer previamente algunas definiciones. Así, la **ciencia** puede definirse como el conjunto sistematizado de conocimientos centrados en la comprensión de objetos y fenómenos y en la deducción de los principios que los rigen. Podría resumirse entonces que el objetivo de la Ciencia es **comprender**.

Por su parte, Jorge Sábato [1] definió la **tecnología como** “un conjunto ordenado de conocimientos (científicos, técnicos y empíricos) utilizados en la producción y comercialización de bienes y servicios”. Puede aquí también resumirse que el objetivo de la tecnología es la **producción de bienes y servicios**

Obsérvese que acorde a estas definiciones, la diferencia principal entre ciencia y tecnología pasa por el objetivo.

La relación entre la ciencia y la tecnología atravesó diversos estados contradictorios a lo largo de la historia. En el mundo clásico, la ciencia perteneció al entorno aristocrático de los filósofos que elucubraban sobre las raíces y la sustancia del conocimiento, mientras que la tecnología era posesión de los artesanos y en general de los hacedores de objetos.

A partir de la edad media surge la concepción de que ambos conceptos están vinculados a través de la cadena de implementación. Esta asociación fructifica espectacularmente en el siglo XIX en que grandes inventores como Edison , Graham Bell o Marconi se inspiraron en los descubrimientos científicos de Faraday , Helmholtz o Hertz .

Podría entonces decirse que la tecnología es pragmática y obviamente utiliza la ciencia, ya que disponer de los principios básicos facilita estructurar las técnicas. Sin embargo, cuando la ciencia no provee los conocimientos para producir un bien o servicio, la tecnología no duda en incorporar información empírica, tal cual indica la definición de Sábato.

Es así, que abundan ejemplos donde el hombre elaboró y aún actualmente elabora objetos basándose en el empirismo sin saber a “**ciencia cierta**” que es lo que en realidad está ocurriendo..

Así, en el campo de la tecnología de Alimentos, los Egipcios elaboraban pan desconociendo totalmente la existencia del gluten. (Jacopo Bartholomew Becari describió el método para aislar el gluten en 1745)

Similarmente, Nicolás Appert descubrió el proceso de conservación de alimentos que hoy se conoce como pasteurización (eliminación de microorganismos patógenos a través de un tratamiento térmico) en 1794, ii 70 años antes que Pasteur presentara su famoso reporte sobre los microorganismos rebatiendo la teoría de la generación espontánea !!.

Finalmente, aún hoy hay cocineros que hacen deliciosos guisos sin tener idea de las complejas reacciones que experimentan durante la cocción los cientos de compuestos intervinientes en la generación de ese sabor que tanto aprecian sus clientes.

En definitiva, la tecnología, en su necesidad de crear bienes y servicios, se nutre igualmente de conocimientos científicos, si están disponibles, o de empirismo cuando la ciencia aún no tiene las respuestas.

## 2. Relaciones entre Ciencia e Industria

Las definiciones precedentes permiten clarificar las relaciones entre la ciencia y la industria.

Así, según se muestra en la Fig. 1, la investigación científica y la información empírica aportan a un pool de conocimientos que, al crecer, plantea nuevas incógnitas que a su vez generan nuevas investigaciones. Se origina así un círculo virtuoso que implica el crecimiento de la ciencia. Por su parte, la industria realiza desarrollos tecnológicos abrevando de ese pool de conocimientos, juntando aspectos multidisciplinarios para crear bienes y servicios útiles y comercializables.

Como ejemplo, las experiencias realizadas por Michel Faraday en 1831 en la Royal Society de Londres moviendo una barra de hierro en el interior de un arrollamiento metálico y demostrando la inducción electromagnética, fueron utilizadas, en 1871 por Graham Bell, junto con otros conocimientos también disponibles en el pool, para desarrollar el teléfono.

Obviamente, también el desarrollo tecnológico origina incógnitas que son tomadas por el círculo virtuoso y procesadas como investigación tecnológica.

Sin embargo, como la tecnología tiene valor económico, no es extraño que se busque la exclusividad y que se haya establecido, en paralelo, un circuito privado con un pool de conocimientos confidencial e investigaciones de acceso restringido (Fig. 2). Consecuentemente, es normal que en la mayoría de los desarrollos exista una cierta proporción de información crítica y comercializable que se maneja fuera del ámbito público y que en muchos casos, marca justamente la competitividad empresarial.

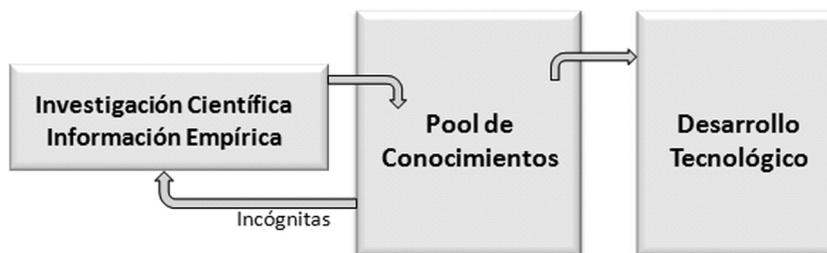


Figura 1. Relación entre Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico

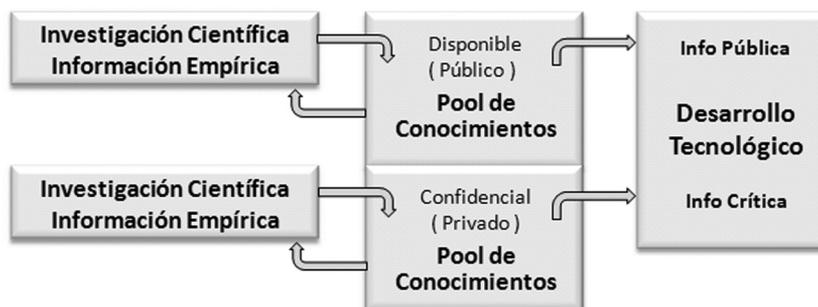


Figura 2. Conocimientos disponibles y confidenciales

### **3. Incorporación de tecnología en el Sector Productivo**

Una Empresa industrial transforma: materias primas, trabajo, capital y tecnología en productos y servicios cuya comercialización genera ganancias. Una parte de esas ganancias, es a su vez reinvertida en nuevos proyectos de crecimiento que requieren incorporar más tecnología. En otras palabras, una industria en crecimiento tiene una permanente demanda de tecnología que puede canalizarse a través de las modalidades que se describen a continuación.

#### **3.1 Compra. (Equipamiento, Patentes, Licencias, etc.)**

En la industria de alimentos, la compra es la modalidad más utilizada para incorporar equipamiento ya que, en general, suele considerar que la construcción de equipos no es su negocio ni su mejor competencia. Inversamente, la compra es una modalidad poco frecuente para el desarrollo de productos, aunque en algunos casos pueden comprarse patentes o licenciar formulaciones y/o procesos.

Como ejemplo de esta última alternativa cabe mencionar el licenciamiento de las premezclas para tortas Betty Crocker realizado por Molinos Rio de la Plata a General Mills en 2001 y que involucró el uso de la marca y la cesión del know how en términos de formulaciones, especificaciones de insumos, normas de proceso y normas de control de calidad.

Respecto a la compra de equipamientos, la tecnología viene en parte incorporada en las maquinarias y en parte como know how para el procesamiento de productos (normas de proceso, manuales de operación y mantenimiento, etc). Al respecto, para cada uno de los diversos procesos que utiliza la industria alimentaria, existen a nivel mundial proveedores de equipamiento super especializados que en general acreditan décadas de experiencia en el desarrollo de equipos.

Esa larga experiencia se traduce en una excelente performance de los equipos ofrecidos, aunque lamentablemente conspira contra la posibilidad de abrir los paquetes tecnológicos a emprendimientos nacionales. Efectivamente, las tecnologías básicas para la elaboración de alimentos suelen ser conocidas y disponibles, pero la verdadera diferenciación aparece en lo que podríamos llamar “detalles”. Esos detalles los van incorporando las Empresas en sucesivas generaciones de equipos, mediante un proceso de mejora continua y obviamente forman parte del pool de conocimientos privado y confidencial, ya que les proveen competitividad. Se establece entonces un círculo virtuoso del tipo: más equipos vendidos → mas “detalles” resueltos → mejor performance → más equipos vendidos. El triste resultado para los países en vías de desarrollo, es que a la hora de comprar un equipo resulta difícil arriesgar a favor del producido en el país con muy poca experiencia y pocos “detalles” resueltos, por lo que se termina comprando el importado que ha vendido cientos de versiones a nivel mundial.

#### **3.2. Empresas prestadoras de servicios para el desarrollo de productos**

Esta modalidad se instrumenta a través de Empresas privadas, con experiencia internacional, que proveen servicios para el desarrollo de productos. Un ejemplo entre otras, es Leatherhead [2], una Empresa inglesa que además de proveer laboratorios y expertos para el desarrollo del producto que uno solicite, también pone a disposición plantas pilotos para los ensayos en mayor escala. Se contratan con antelación determinados días de ensayos y durante ese tiempo las instalaciones y técnicos están a disposición y en exclusividad para el cliente.

Obviamente, requieren el traslado de personal y materias primas, pero tienen la ventaja que además de proveer las instalaciones para los ensayos, aportan al desarrollo importante información crítica confidencial a través de los expertos y técnicos intervinientes.

### **3.3. Desarrollo “in house”**

Sin embargo, la modalidad más generalizada en el Sector alimentario, es lo que podríamos llamar “desarrollo in house”, donde la Empresa posee una Gerencia o un sector encargado del desarrollo de productos. Normalmente, este sector dispone de profesionales experimentados, así como de laboratorios y en algunos casos de plantas pilotos. Una de las razones por las que muchas empresas adoptan esta modalidad es disponer de un sector depositario del know how tecnológico, con la potencialidad de perfeccionarlo y de generar innovaciones, a la vez que satisface dos aspectos que para las empresas son vitales: confidencialidad y exclusividad.

La confidencialidad es fundamental para no alertar a la competencia de la salida de un nuevo producto al mercado. Ser el primero es una ventaja competitiva importantísima. Al mismo aspecto apunta la exclusividad. Para tener un producto exitoso es fundamental que se diferencie del resto y si bien tarde o temprano los demás intentarán copiarlo, cuanto más se demore ese momento, debido a la existencia de barreras de entrada, mayor será el tiempo disponible para la adopción y el crecimiento de la marca en el mercado.

Obviamente, el “desarrollo in house” también requiere información no disponible en el pool público por lo que presenta distintas alternativas para su obtención.

#### *3.3.1. Relación o asociación con proveedores*

La relación con los proveedores, tanto de insumos como de equipamiento, resulta crítica para la llegada de tecnología a las empresas elaboradoras, ya que no solo llega incorporada en los ingredientes o máquinas, sino que además aportan información fundamental durante la negociación o como servicio post venta. Este aspecto es particularmente importante, porque por el grado de especialización que tienen las empresas proveedoras, muchas veces multinacionales, por lo general aportan información crítica no disponible en el pool de acceso público.

En algunos casos, existe la posibilidad de establecer una asociación técnica con el proveedor de alguno de los insumos críticos, de manera que las experiencias se realizan en conjunto en los laboratorios de ambas empresas. Por supuesto que ello involucra abrirle la fórmula al proveedor y deberán tomarse las medidas contractuales adecuadas para no vulnerar la confidencialidad y la exclusividad.

#### *3.3.2. Interacción con Grupos de Investigación y Desarrollo estatales*

En esta alternativa se busca el asesoramiento de algún grupo de investigación y desarrollo dispuesto a vincularse con la industria. Nuevamente aquí y tal vez con más criticidad, aparecen los condicionamientos de confidencialidad y exclusividad.

Esta alternativa es la que justifica en cierto modo el esfuerzo que hace el Estado para formar y mantener grupos de científicos y tecnólogos capaces de aportar al desarrollo y crecimiento de la Industria nacional.

Sin embargo, esta interacción tan importante y necesaria no se produce naturalmente y si bien las acciones del Estado a través de sus organismos de promoción facilitan cada vez más esta modalidad, aún son pocas las interacciones exitosas en relación a la inversión realizada.

En el caso que nos ocupa de desarrollo de nuevos productos, la interacción entre ambos sectores está fuertemente condicionada por las características del desarrollo “in house” en el Sector productivo, por lo que se describirá someramente el procedimiento que se utiliza para el desarrollo de nuevos productos.

#### **4. Características del Desarrollo de Productos en la Industria Alimentaria**

Se ha visto en 1. que “ desarrollar “ consiste en articular toda una serie de piezas sueltas con el objeto de crear un nuevo bien o servicio. Sin embargo, es interesante destacar, sobre todo en el caso de productos, que el destino final de los mismos impone condicionamientos al desarrollo. Así por ejemplo, los productos de consumo masivo no solo requieren resolver aspectos técnicos a efectos de proveerles funcionalidad, sino que también deberán considerarse aspectos inherentes a la comercialización para darles competitividad. Solo aquellos productos destinados a un mercado no competitivo admiten ser desarrollados con condicionamientos exclusivamente técnicos.

En el caso particular de los productos alimenticios, los condicionamientos para el desarrollo son múltiples, ya que deben ser seguros, estables, nutritivos, funcionales, prácticos y con características organolépticas atractivas, pero además deben incluir elementos diferenciadores que los hagan competitivos en el mercado.

Justamente, un aspecto fundamental que caracteriza el desarrollo de productos en la industria alimentaria, consiste en definir si es primero el producto o el mercado.

Al respecto, es muy común que aquellos que trabajan en Universidades o Grupos de Investigación y Desarrollo tiendan a inclinarse por lo más intuitivo: primero disponer del producto y luego buscar a quien venderle el know how.

Sin embargo, esta concepción parte de creer que el desarrollo del producto está exclusivamente condicionado por limitaciones técnicas. En las Empresas, en cambio, priva el concepto más “marketinero” de que el producto debe estar principalmente condicionado por la satisfacción del consumidor y la posibilidad de una comercialización competitiva. Consecuentemente, del lado de la industria, en la mayoría de los casos es primero el mercado y después el producto.

Por tanto, en búsqueda de una mayor probabilidad de que el producto sea exitoso, antes de desarrollarlo, es crítico conocer al consumidor que lo va a comprar y al mercado existente donde se lo va a posicionar competitivamente.

Efectivamente, previo al desarrollo hay que saber:

- Quien lo consumirá, que necesita, que expectativas tiene, etc.
- Que oferta existe en el mercado, quienes son los oferentes, etc

Como un ejemplo patético de un invento sin un estudio de mercado previo, cabe mencionar el caso de Tomás Alva Edison. Un gran inventor, que tiene registradas 1093 patentes (aún es record). Su primera patente data de 1868 y se trataba de un contador de votos que ofreció al Congreso. Calificaron el aparato de superfluo. Jamás olvidó la lección y acuñó la frase “lo que no se venda no quiero inventarlo”.

Es justo sin embargo mencionar que, aunque excepcionales, han habido también algunas opiniones adversas respecto a la necesidad de estudios de mercado previos. Así por ejemplo, Steve Jobs (CEO de Apple) decía [3]: “ La gente no sabe lo que quiere hasta que uno se lo muestra “. Cabe aclarar que con esa actitud lanzó productos extremadamente exitosos pero también tuvo estrepitosos fracasos que hicieron historia. El mismo Jobs apoyaba su opinión citando un comentario de Henry Ford que decía: Si les hubiese preguntado a mis clientes que querían, me hubieran contestado “un caballo más rápido”

Anécdotas aparte, la inclusión del consumidor y el mercado hace que el desarrollo de un producto sea un proceso de compleja coordinación que requiere ensamblar toda una serie de aspectos: técnicos (físicoquímicos, nutricionales, sensoriales, regulatorios, etc) con otros vinculados al marketing como las expectativas explícitas e implícitas de los consumidores, el mercado existente, los claims a utilizar, la comunicación, el precio, etc.

A tal efecto, en la industria el desarrollo se realiza en equipo y en etapas, con evaluaciones periódicas, para reducir el riesgo y abortar lo antes posible si el proyecto se hace inviable.

Por consiguiente, la primera etapa consiste en la organización de un equipo de lanzamiento multisectorial encargado de la implementación del proyecto conformado entre otros por los siguientes sectores de la Compañía: Marketing, Investigación y Desarrollo, Ingeniería Industrial, Producción, Compras, Finanzas, Legales, Distribución y Ventas.

Estos sectores interactúan de a grupos en las siguientes etapas. El liderazgo del equipo es ejercido por Marketing que se encarga de la gestión del Proyecto, el manejo de la interacción entre sectores e informar y rendir cuentas en las evaluaciones periódicas.

Una vez organizado el equipo, hay que resolver el problema de conocer el mercado sin tener el producto. A ese efecto se utiliza lo que se denomina un concepto por lo que la segunda etapa consiste en la generación y testeo de ese concepto.

Efectivamente, en esta etapa, en base a: estudios de mercado, comportamiento de los consumidores, información sobre la competencia y conocimiento de las tecnologías disponibles, se genera un concepto que entre otras cosas incluye:

- Las características del producto (nutricionales, funcionales, sensoriales, etc.)
- El segmento objetivo (consumidores potenciales del producto)
- Los beneficios que aporta (salud, practicidad, gratificación, etc.)
- La diferenciación (en que se diferencia de los demás productos del mercado)
- El posicionamiento de precio (precio propuesto en relación a la competencia)

Una regla de oro en el desarrollo de productos, es que nadie debe arrogarse el derecho de opinar sobre preferencias en nombre de los consumidores, por lo que el concepto generado debe testarse con grupos de consumidores. Por lo general, esto se realiza por medio de Focus Groups (grupos de 8 a 12 consumidores con la conducción de un moderador, vierten comentarios, percepciones y preferencias acerca del concepto a la vez que se indaga la intención de compra, la sensibilidad al precio y los beneficios percibidos del producto). Si el concepto es aceptado, se prosigue a la tercera etapa. Si no lo es, se reforma acorde a las críticas o se aborta el proyecto.

La tercera etapa involucra la elaboración de un Plan de Lanzamiento o Plan de Marketing. Con la información obtenida en los Focus Groups y los estudios de mercado, se elabora una estrategia comercial y previa factibilidad técnica y análisis financiero, se estructura el Plan que entre otras cosas detalla: características del producto, publicidad, canales de comercialización, precio y volúmenes de venta, facturación prevista, retorno de la inversión y cronograma de tareas con los respectivos responsables.

En base a ese Plan, Marketing, como líder, dispara tareas a los distintos integrantes del equipo. Entre ellas, lo que nos ocupa: un Brief a Investigación y Desarrollo para que proceda al desarrollo del prototipo, lo que constituye la cuarta etapa del Proyecto.

El Brief incluye:

- Características del producto (físicas, sensoriales, funcionales)
- Packaging (primario y secundario)
- Segmento objetivo
- Tipo de distribución (seca, refrigerada, congelada)
- Vida útil
- Volumen de venta estimado
- Restricciones de costo

Como puede verse, el desarrollo del producto no es enteramente libre y abierto, ya que el Brief originado en el Plan de Lanzamiento, condiciona fuertemente el desarrollo. Por ejemplo, no solo define características físicas, sensoriales y funcionales que debe tener el producto, sino que también impone características del packaging, la vida útil esperada y

restricciones de costo. Si durante el desarrollo surge que a ese costo no hay producto que cumpla el resto de las condiciones, el equipo verá si se puede hacer alguna concesión y si no es posible, deberá abortarse el proyecto.

A los efectos del desarrollo del prototipo, Investigación y Desarrollo interactúa con Marketing y trabaja sobre la formulación del producto, las condiciones de proceso y la interacción producto/packaging buscando entre otras cosas: seguridad, estabilidad, nutrición, color, aroma, sabor, textura, funcionalidad, vida útil y factibilidad de industrialización.

El desarrollo se basa en el Brief y hay un testeo permanente contra el concepto. Este proceso de testeo se realiza conjuntamente con Marketing.

Una vez que el prototipo es aprobado por marketing, se procede a un nuevo testeo con consumidores, esta vez con producto. Si es aceptado se procede a la quinta etapa que es la de implementación de la producción, ya que ese producto elaborado en un laboratorio, o en escala banco o en una planta piloto, tiene ahora que ser producido en una planta industrial.

En esta etapa intervienen: Investigación y Desarrollo, Ingeniería Industrial, Producción y Mantenimiento y comprende como subetapas: selección de equipamiento, evaluación financiera del proyecto, compra del equipamiento (si corresponde), montaje, puesta en marcha y producción piloto.

Esta etapa involucra una profunda relación con los proveedores del equipamiento que se manifiesta a través de: asesoramiento en la selección de tecnologías, visitas y ensayos en otras plantas, soporte técnico en el montaje y puesta en marcha, etc.

El producto final, obtenido en la producción piloto, vuelve a ser testado contra el prototipo aceptado por los consumidores ya que muchas veces la producción industrial conduce a importantes desvíos en las características del producto.

Obviamente, el desarrollo de nuevos productos no es la única actividad del Sector de Desarrollo de Productos de las Empresas elaboradoras, ya que una vez en el mercado, los productos siguen requiriendo cambios a efectos de mantener su competitividad. Esos cambios se manifiestan a través de lo que se denomina “mejora continua” que implica la búsqueda permanente de reducción de costos, mayor funcionalidad, simplicidad operativa, mayor vida útil, etc. a través de reformulaciones, mejoramiento de procesos, cambios de packaging o introducción de nuevas tecnologías.

Resumiendo: las características principales del desarrollo de productos “in house” son:

- Trabajo en equipo multisectorial
- Primero el mercado y luego el producto
- Permanente testeo contra los potenciales consumidores del producto
- Desarrollo del prototipo condicionado a los requerimientos comerciales.
- Cuando se empieza el desarrollo del producto ya se sabe estimativamente que se quiere, para cuando tiene que estar listo, cuanto debe costar, que volumen se va a vender y a que precio. Estos aspectos son típicos del desarrollo de productos y obviamente resultan prácticamente impensables en la investigación científica.
- Alta confidencialidad – la ventaja de ser primero
- Exclusividad – barrera de entrada a la competencia
- Importante participación y hasta asociación con proveedores de ingredientes
- Profunda interacción con los proveedores de equipamiento
- Mejora continua sobre los productos ya lanzados al mercado

## **5. Interacción entre Grupos de Investigación y Desarrollo y el Sector Productivo**

Por su parte, los Grupos de Investigación y Desarrollo, obviamente con las debidas excepciones, suelen presentar las siguientes características:

- En general son organismos financiados por el Estado (dependientes de Universidades, CONICET u otros organismos estatales.)
- Una buena parte, presentan una estructura más orientada a la investigación científica (contribuciones al conocimiento) que al desarrollo tecnológico. Como consecuencia, muchos de ellos han llegado a ser altamente eficientes en la formación de recursos humanos y en la publicación de papers a nivel internacional lo que les otorga buena consideración por parte de los organismos de seguimiento (Universidades, CONICET, etc.). Sin embargo, ese sesgo hacia la investigación científica suele descuidar las actividades de desarrollo por lo que es usual que al mismo tiempo presenten una limitada interacción con el sector productivo. Esta distorsión fue oportunamente pronosticada y criticada por Jorge Sábato [1] que, para evitarla, proponía que en vez de “Laboratorios de Investigación y Desarrollo” se los llamara “Fábricas de Tecnología”
- Es cierto, que en muchos casos, los temas sobre los que se trabaja son orientados hacia la problemática productiva, pero también lo es que muy frecuentemente, los resultados, aunque valiosos, terminan aportando al pool de conocimientos como investigaciones tecnológicas y no a la solución explícita de problemas del sector productivo.
- Muchos de estos Grupos han alcanzado tamaño crítico, un cierto grado de multidisciplinaridad y niveles de excelencia internacionales que se manifiestan por la publicación de papers originales en las mejores revistas del mundo.
- Asimismo, la formación de recursos humanos, ya mencionada, suele ser de primer nivel y se manifiesta a través de Carreras de Posgrado y/o Cursos individuales de Posgrado y Especialización.
- En general, están medianamente instrumentados, en especial aquellos que integran el sistema de Centros Regionales financiado por el CONICET.
- Suelen presentar sin embargo, baja confidencialidad, producto de un estilo de trabajo abierto y de su dependencia con el Estado, que les exige informes periódicos a ser evaluados por comisiones asesoras.
- Es frecuente que los grupos bien instrumentados presten servicios a la industria, aportando técnicas analíticas, servicios instrumentales, ensayos en planta piloto, etc. Estos servicios constituyen una importante alternativa para iniciar vínculos con el Sector Productivo.

La interacción de los Grupos de Investigación y Desarrollo con el Sector Productivo suele realizarse a través de las siguientes modalidades:

### ***5.1 Investigación científica sobre aspectos tecnológicos***

En ese caso, las contribuciones generadas se vuelcan al pool de conocimientos y allí permanecen hasta ser tomadas por el Sector Productivo. Esta modalidad está bastante extendida en nuestro medio y debiera considerarse positiva solo a los efectos de formar recursos humanos y acumular know how en la etapa de crecimiento del grupo, ya que hay alta posibilidad que los resultados queden en el pool de conocimientos, sin ser utilizados por el Sector Productivo del país.

### **5.2 Investigación Científica a requerimiento del Sector Productivo**

Los desarrollos en el Sector Productivo, urgidos por los tiempos en que se ejecutan, si bien llegan tarde o temprano a una solución satisfactoria, dejan normalmente, toda una serie de incógnitas que deben resolverse a posteriori para que el producto evolucione, se mantenga competitivo y eventualmente dé origen a otras innovaciones. Cuando las Empresas demandan ese conocimiento soporte a Grupos de Investigación y Desarrollo se genera una nueva modalidad de interacción.

Esta modalidad, al igual que la descripta en 5.1, también involucra investigación científica sobre aspectos tecnológicos, pero es netamente distinta, ya que en este caso la investigación es solicitada por el Sector Productivo y los resultados van directamente al laboratorio de desarrollo de la Empresa lo que asegura su uso. Obviamente, una vez convenida su exclusividad, estos trabajos deben ser facturados. Es importante destacar la diferencia de esta interacción con la descripta en el párrafo anterior. En el primer caso, la contribución financiada por el Estado Argentino pasa al pool de conocimientos público, de donde puede ser extraída por cualquier grupo de desarrollo del mundo o permanecer allí sin que nadie la utilice. En el segundo caso, en cambio, los resultados benefician el desarrollo de la industria local.

Ejemplos de este tipo de interacción son cada vez más abundantes a través de convenios de cooperación entre Empresas y Grupos de Investigación y Desarrollo estatales, especialmente en el marco de las distintas modalidades de promoción que ha ido implementando el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva.

### **5.3. Trabajos de Consultoría**

Otra forma de interacción con el sector productivo es la Consultoría. Así, es común que durante un desarrollo “in house”, aparezcan problemas de difícil solución, donde la información disponible no es suficiente o es de difícil interpretación, por lo que la Empresa suele recurrir a un Consultor. Por lo general se busca personas con experiencia en el tema en cuestión, que pueden provenir ya del sector privado o, en el caso que nos ocupa, de grupos de investigación y desarrollo del sector estatal.

Ejemplos de tales problemas, en el desarrollo de productos en la industria alimentaria, pueden ser: falta de funcionalidad del producto, vida útil menor a la esperada, condiciones de procesamiento no del todo adecuadas, etc.

En términos generales, la Empresa trabaja en desarrollos con plazos muy estrictos y cuando el proyecto se demora con alguno de estos problemas, no se escatiman esfuerzos para su rápida resolución y seguir adelante lo antes posible. Justamente, las características de esta demanda, hace que la Empresa imponga ciertos condicionantes a estos servicios de consultoría.

Un primer condicionante, es que la respuesta debe ser a medida. En otras palabras, la información requerida es sumamente precisa: una formulación, un ingrediente, un procedimiento, una condición de operación, etc. No interesan aspectos generales, solo hace falta un detalle, una pieza de información que se inserte exactamente en el esquema de desarrollo y lo destrabe definitivamente.

Otro condicionante importante es la velocidad de respuesta. Los desarrollos de productos tienen tiempos del orden de meses. No es aceptable que ante el requerimiento, la respuesta sea “vamos a poner un becario a trabajar en el tema”. La Empresa sabe que seguramente hay muchas personas en el mundo que tienen la respuesta que busca, por lo que no va a dudar en contratar el Consultor adecuado, en cualquier lugar que se encuentre, a efectos de resolver el problema en tiempo y forma.

Finalmente, también es crítico el condicionamiento de confidencialidad ya que, como se ha mencionado, es fundamental evitar una alerta temprana en la competencia acerca del lanzamiento de un nuevo producto.

### **5.4 Participación en desarrollos “in house”**

Obviamente, la modalidad deseable y de máxima interacción con la Industria, es la participación del Grupo de Investigación y Desarrollo en un desarrollo “in house”. Aquí cabe la posibilidad de una prestación mucho más amplia y puede involucrar aspectos de formulación

de productos, condiciones de procesamiento, ensayos en planta piloto, simulación de procesos, estudios de vida útil, eficacia biológica en alimentos funcionales, etc.

Obviamente, en este caso, los condicionamientos para interactuar con el Sector Productivo son mayores ya que además de la confidencialidad y exclusividad, ya comentadas se requiere:

*Un marco contractual:* Se trata de un trabajo realizado por un organismo estatal para una Empresa privada por lo que corresponderá cubrir los aspectos legales correspondientes.

*Profesionales de vínculo:* El grupo de Investigación y Desarrollo deberá disponer de profesionales que interactúen con la Empresa coordinando las necesidades de ambas partes.

*Interacción técnico - comercial:* Como todo desarrollo “in house” los trabajos estarán condicionados por las restricciones impuestas por marketing a través de un brief como el ya descrito y esos condicionamientos abarcarán también las tareas del Grupo de Investigación y Desarrollo estatal.

## 5.5 Desarrollo integral de productos

Por último, también cabe la posibilidad que los Grupos de I. y D. desarrollen productos integralmente con la intención de vender luego el know how a alguna Empresa interesada.

Existen algunos ejemplos exitosos de esta forma de interacción por lo que merece un análisis de los requisitos necesarios para llevarla a cabo. En primer término, las tareas deberán ser multidisciplinarias ya que un desarrollo integral involucra: formulación, condiciones de proceso, packaging, vida útil, funcionalidad, ensayos en planta piloto, condiciones de industrialización, etc.

Sin embargo, como en este caso quienes hacen el desarrollo no son los que van a comercializar el producto, es muy factible que falten en el desarrollo varios de los elementos típicos del desarrollo “in house” ya vistos, como son:

- Primero el mercado luego el producto
- Condicionamientos comerciales (brief) especialmente en lo que se refiere a las características del producto y las restricciones de costo
- Testeo con consumidores. Para poder testearlo es necesario haber definido el segmento objetivo.
- Implementación de la producción. Es difícil que los Grupos de Investigación y Desarrollo avancen más allá de la escala piloto.

En general, solo el Sector Productivo puede suministrar estos elementos, por lo que existe una gran probabilidad que la Empresa que compre el know how deba adaptar el producto al mercado a efectos de hacerlo competitivo.

Una alternativa para facilitar la viabilidad de esta modalidad consistiría en desarrollar lo que podríamos llamar productos “base”, donde se logra un producto seguro, estable, funcional, etc. y susceptible de ser adaptado mas o menos rápidamente a los requerimientos de un brief de la Empresa que lo comercializará. Esta alternativa suelen utilizarla los laboratorios de aplicación de las Empresas proveedoras de flavors (aromas y sabores). Si bien la competencia principal de estas Empresas no es el desarrollo de productos, sino la obtención de flavors, es muy común que para hacer demostraciones a sus clientes, apliquen los flavors en formulaciones “base”, generalmente más simples y menos sofisticadas que las existentes en el mercado, pero que permiten evaluar el comportamiento del flavor. Una vez que se ha generado interés, es el Sector de Desarrollo de la Empresa que adquiere el insumo quien termina de aplicarlo en el desarrollo del producto definitivo.

También cabe esta modalidad integral para el desarrollo de insumos (ingredientes que formarán parte del producto final comercializable). Un ejemplo exitoso es el desarrollo en el CERELA (CONICET) del fermento *Lactobacillus casei*:

CRL 431 utilizado como parte de la formulación de SancorBio, una línea de Yogures bebibles.[4]

Es interesante mencionar que esta alternativa se hace cada vez más frecuente a nivel mundial en una fase más evolucionada, donde grupos de investigación y desarrollo académicos capaces de alcanzar innovaciones de ruptura, originan su propia empresa de base tecnológica (empresas pequeñas, innovadoras, que basan su competitividad en el conocimiento científico, generadoras de bienes y servicios de alto valor agregado). Así, en el campo de la biotecnología, es cada vez más frecuente el patentamiento de microorganismos, enzimas, etc. a la vez que es posible avizorar un fenómeno similar en el campo de la nanotecnología.

Obviamente, en aquellos casos en que el producto no necesita ser competitivo, el desarrollo integral por los Grupos de Investigación y Desarrollo es más factible, ya que se minimizan los condicionamientos impuestos por la competitividad del mercado. Este es el caso, de los productos que no están a la venta por formar parte de proyectos sociales. Como ejemplo cabe mencionar a Yogurito, un yogurt totalmente desarrollado por el CERELA a base del *Lactobacillus rhamnosus* CRL 1505 que elabora industrialmente una Empresa láctea local y que reciben 100.000 niños de Escuelas tucumanas 3 veces por semana. [5].

## 6. Conclusiones

Podría decirse entonces que, en lo que se refiere a desarrollo de productos, independientemente de la modalidad adoptada por los Grupos de Investigación y Desarrollo para vincularse a la industria, en la gran mayoría de los casos, el producto final, se completará en los laboratorios de desarrollo del Sector Productivo.

Por tanto, es fundamental que los Grupos de Investigación y Desarrollo adapten su estructura y su modalidad de trabajo a los distintos requerimientos aquí enumerados y a la vez busquen prioritariamente la vinculación con el Sector Productivo, única manera de asegurar un destino cierto a la valiosa información que generan los grupos de investigación y desarrollo financiados por el Estado.

En este aspecto conviene enfatizar que a diferencia de los grupos de investigación científica, aquellos que además incluyen la palabra “desarrollo” tienen una doble responsabilidad. No solo deben proveer excelencia en sus publicaciones y en la formación de recursos humanos, sino que también deben asumir el compromiso de contribuir al fortalecimiento y crecimiento tecnológico de la industria nacional y en este aspecto la vinculación con el Sector Productivo es primordial.

En las Jornadas sobre Trasferencia de Tecnología realizadas en Mar del Plata en 1983 [6], el autor presentó un esquema similar al de la Fig. 3 donde comparaba la cadena de implementación desde la Investigación a la Producción pasando por el Desarrollo y distinguiendo países desarrollados (a) y países en vías de desarrollo (b) y (c).

Investigación básica	Investigación aplicada	Desarrollo	Producción	
Sector Científico - Tecnológico		Sector Productivo		(a)
Sector Científico - Tecnológico		?	Sector Productivo	(b)
Sector Científico - Tecnológico		Sector Productivo		(c)

Figura 3. Interacción Investigación-Desarrollo-Producción

En los países desarrollados, donde el Sector Productivo está muy evolucionado, la transferencia es fluida, porque las Empresas mantienen planteles profesionales de calidad y tamaño tal, que no solo les permite tomar e interpretar información del pool público, sino que realizan investigación aplicada y en algunos casos también investigación básica, gran parte de la cual mantienen en el pool de conocimientos confidenciales.

El Sistema Científico Tecnológico, se limita entonces, sin problemas, a generar contribuciones al conocimiento, que vuelca al pool público o al privado, con una oportuna selección de temas, que surge de las relaciones que los Profesores y Advisors mantienen con el Sector Productivo en sus actividades de Consultoría.

Cuando en los países en vías de desarrollo, donde el Sector Productivo no tiene esa capacidad, se repite la estructura del Sector Científico-Tecnológico a imagen y semejanza de las Universidades Norteamericanas por ejemplo, la situación es la menos deseable porque el Estado invierte en generar información para el pool, pero esta no se utiliza generando el gap que se muestra en la Fig. 3.b.

En el esquema presentado en el año 83 la propuesta era que el gap lo cubrieran los Grupos de I. y D. Sin embargo, en base a los argumentos expuestos, resulta obvio que el esquema debe ser modificado según se muestra en la Fig. 3 c y que la brecha para el desarrollo de productos, debiera ser cubierta desde ambos lados, generando una oferta de los Grupos de Investigación y Desarrollo en términos de los condicionamientos mencionados en este artículo y una demanda genuina por este tipo de interacciones en el Sector Productivo. Al respecto, es importante enfatizar que esa demanda genuina deberá materializarse a través de la aplicación de recursos que alimenten esa interacción entre el sector público y el privado.

## REFERENCIAS

- [1] J.A. Sabato, Empresas y fábricas de Tecnología, en *El pensamiento latinoamericano en la problemática ciencia-tecnología-desarrollo-dependencia*, J.A. Sabato, Ediciones Biblioteca Nacional, 2011 pp 309-339.
- [2] Leatherhead Food Research. Innovation and Development for Food and Drink <http://www.leatherheadfood.com/product-development>
- [3] W. Isaacson, *Steve Jobs: la biografía*, 5ta. Edición, Debate, Buenos Aires, 2011
- [4] Los probióticos - Agentes beneficiosos para la salud. El *L.casei* en alimentos [http://www.cerela.org.ar/ciencia/p\\_lcasei.htm](http://www.cerela.org.ar/ciencia/p_lcasei.htm)
- [5] Yogurito escolar - Bioyogur. Pensado por científicos tucumanos para una mejor calidad de vida. <http://www.cerela.org.ar/docs/yogurito2012.pdf>
- [6] A. Calvelo, Mecanismos de generación de Tecnología, *1ras. Jornadas sobre Transferencia de Tecnología en Industrias de Procesos* (SUBCYT) 1981, pp 389-400.



## **FALLAS EN CAÑERÍAS DE GAS Y PETRÓLEO: La experiencia argentina**

*José Luis Otegui*

Y-TEC (YPF – CONICET), Argentina.  
Jose.l.otegui@yptechnologia.com

### **Resumen**

En este trabajo se efectúa una descripción sucinta de las condiciones que han llevado a fallas y daño de tuberías enterradas en la Argentina, teniendo en cuenta las características particulares del suelo, la evolución demográfica, las normas y los procedimientos de construcción y las condiciones de daño específicas. El sistema de tuberías de transmisión de petróleo y gas de alta presión argentina incluye más de 40.000 kilómetros de tuberías enterradas. Los diámetros varían desde menos de 14 hasta 36 pulgadas. Su construcción abarca el período 1960 a 1980.

*Palabras clave:* Análisis de fallas, Tuberías enterradas; mecanismos de daño; corrosión bajo tensiones; tubos ERW.

### **Abstract**

In this work a brief description is made of the conditions that resulted in damage and failures of buried pipelines in Argentina, taking into account the soil characteristics, demographic evolution, construction standards and particular damage conditions. The pipeline system for high pressure oil and gas transportation comprises more than 40.000 kilometers of buried pipelines. Diameters vary between less than 14 inches and 36 inches. The construction period ranges from 1960 to 1980.

*Keywords:* Failure analysis, buried pipelines, damage mechanisms, stresses corrosion cracking, ERW linepipes.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los países de América del Sur han acelerado la explotación de sus recursos de petróleo y gas. Algunos son relativamente recién llegados a la industria; y por lo tanto, sin mucha experiencia en cuanto a cuáles son las amenazas más importantes para la integridad de las instalaciones. Este es el caso, sobre todo, de Bolivia, y en menor medida, de Perú, Colombia y Ecuador. Aunque Venezuela ha sido durante mucho tiempo un gran exportador de crudo, no se ha adquirido gran experiencia en cuanto a la integridad de grandes tuberías. En Brasil las tuberías e instalaciones relacionadas son relativamente nuevas. Otros países tienen una larga historia de tuberías de petróleo y gas, principalmente para las necesidades de energía locales. Argentina, por ejemplo, solía tener grandes instalaciones de petróleo y gas controladas por el Estado. La mayoría de las instalaciones construidas ya en los finales de los años 50 todavía están en uso; y así, las fallas debidas al medio ambiente, el funcionamiento y los daños por terceros han sido relativamente frecuentes y están bien documentadas.

Con la excepción de fallas iniciadas debido a sobrecargas, combustión interna, accidentes o sabotaje, las fallas en ductos inician a partir de daño previo en el cuerpo del tubo o, más frecuentemente, en las soldaduras longitudinales y circunferenciales. Como en todo el mundo, corrosión y daño por terceros son las causas más frecuentes de falla. Otros modos de daño específicos a nuestra realidad son, fatiga, fragilización por hidrógeno y corrosión bajo tensiones. Las características de estos mecanismos están bien descritas en la literatura.

En este artículo vamos a dar una descripción sucinta de las condiciones particulares que han llevado a fallas y daño en tuberías enterradas en la Argentina, teniendo en cuenta las características particulares del suelo, la evolución demográfica, las normas y procedimientos de construcción, y las condiciones de daño específicas en nuestro país. [1], [2].

El sistema de ductos de transmisión de petróleo y gas incluye más de 40.000 km de tuberías enterradas. Los recubrimientos son en su mayoría del tipo fibra de vidrio y alquitrán. Las costuras longitudinales están hechas con soldadura por resistencia eléctrica (ERW) y soldadura por doble arco sumergido (DSAW). Los diámetros van de menos de 14 a 36 pulgadas (350 – 900 mm).

Las fechas de construcción de la mayoría de estos tubos oscilan entre 1960 y 1980. Hasta los 90s, Argentina tenía una tradición de empresas controladas por el estado diseñadas para proporcionar energía para uso local. Este ha sido el caso de YPF y Gas del Estado (Gas del estado). Gran parte de la energía para electricidad, calefacción, transporte, etc. para uso industrial y doméstico deriva del gas natural.

La mayoría de los sistemas construidos a fines de los 50's todavía están funcionando. Los gasoductos San Martín y Norte, que corren de campos de gas a la industrializada región central del país, tienen cada uno varios miles de kilómetros con más de 60 años de edad. El sistema se está modernizando continuamente, pero aún la mayoría de las tuberías más antiguas no tienen alternativas (loops) en caso de que fallas o reparaciones programadas obliguen a cerrar un tramo.

Las tuberías recorren en su mayoría terrenos sedimentarios, planos y estables. En los últimos 20 años, el interés de los responsables de integridad se ha centrado en fallas y daños relacionados con las siguientes condiciones:

- SCC
- ERW y reparaciones viejas
- Falta de identificación de materiales
- Falta de datos sobre las condiciones de funcionamiento
- Aumento de población en torno a las tuberías existentes

## **2. LOS METODOS DE ANALISIS DE FALLAS**

Samuel Coleridge ha dicho: "...la luz que la experiencia nos da es una linterna en la popa, que sólo brilla sobre las olas detrás de nosotros". Pero podemos agregar que en lo que nos ha hundido en el pasado está gran parte de la información necesaria para nuestro éxito futuro. Debe notarse que la mayoría de las fallas son crónicas, el 20% de las fallas crónicas representa el 80% de las pérdidas

Se ha dicho que la mejor manera de aprender es por experiencia propia. Sin embargo, para ello debemos primero aceptar los errores, y luego entender cómo fue que los hemos cometido. Debemos identificar todos los por qué, los cuándo, los cómo. El adecuado entendimiento de las causas de una falla nos permite el aprendizaje por experiencia propia. Es notable cómo la realidad diaria nos muestra que en algunos casos seguimos sin aprender por experiencia propia. Siguiendo con los ejemplos de origen naval, el caso de los compartimientos estancos en barcos es tal vez un ejemplo sorprendente.

El hundimiento del Titanic en 1912 fue una sorpresa porque era definido como insumergible, debido a sus compartimientos estancos. Sabemos sin embargo que debido a un problema de fabricación, ante un impacto lateral fallaron los remaches del casco, y se abrió como lata de sardinas. Un siglo después, la industria naval ha dado un salto cualitativo. Los nuevos sistemas de posicionamiento dinámico IMPIDEN cualquier colisión y vuelta de campana, por lo que los barcos "no necesitan" compartimientos estancos.

Pero el caso del Costa Concordia en 2013 nos muestra que estos sistemas son susceptibles de errores (en este caso, del tipo más humano imaginable). Este accidente generó menos de tres docenas de víctimas. Un año más tarde, las fallas humanas superaron nuevamente al sistema de posicionamiento dinámico y generaron la vuelta de campana del barco coreano Sewol. Pero en este caso, 300 jóvenes, atrapados por confiar en las Instrucciones recibidas, murieron ahogados.

La historia nos dice que en 1912 el capitán se hundió con el barco, como “manda la tradición”, Curiosamente, en los dos accidentes de este siglo, el capitán se salvó primero. Podemos caer contra ellos, como chivos expiatorios, o podemos enfocarnos en investigar posibles cambios en el diseño de estos barcos: Tal vez concluyamos que no se puede confiar en que “con los sistemas actuales es casi imposible colisionar con algo”. Estos barcos sin quilla ni calado dependen del sistema de estabilización dinámica. ¿Es suficiente? ¿El regreso de las mamparas habría evitado esta pérdida de vidas?

Podemos definir una “falla” en forma amplia, como un evento no deseado, un aumento de costos, una interrupción de la producción, un motivo de probable reducción de la confiabilidad. En esta presentación hablaremos de fallas con consecuencias para la población, esto es, con daños materiales y humanos, que han tenido cobertura por los medios.

Una causa inmediata o directa puede ser definida como un evento que ocurrió y cualquier condición que existió inmediatamente antes del resultado indeseado, y que directamente produjo su ocurrencia. Si esta causa inmediata hubiera sido eliminada o modificada, se habría prevenido el resultado indeseado. Una Causa Raíz es cada uno de los factores múltiples (eventos, condiciones o factores orgánicos) que contribuyó a o creó la causa inmediata y el resultado indeseado subsiguiente. En general, múltiples causas raíz contribuyen a un resultado indeseado.

El Análisis de Causas Raíz (Root Cause Analysis, RCA) es un método que permite identificar las causas básicas, la fuente u origen del problema, por lo que la recurrencia del mismo puede ser prevenido. El RCA correctamente realizado nos permite explicar el qué, cómo y por qué. El RCA provee de un método para la, identificación, investigación clasificación, eliminación de causas encadenadas en el evento Su objeto es evitar repeticiones. No incluye penalizaciones, no busca definir responsables civiles o penales, ni dilucidar responsabilidades contractuales. Para estos casos se utilizan otras metodologías, dentro de un proceso definido en general como “Análisis Pericial Forense”.

La aplicación del RCA involucra la definición del árbol Causa-Efecto, en cuyo proceso se definen todas las posibles causas, y las posibles causas de cada causa posible [3]. De este modo se genera una estructura piramidal (“árbol”), en cuya base se ubican las causas originales (“raíz”). Una vez definidas todas las causas posibles, se definen las investigaciones necesarias para verificar la probabilidad de cada causa. Estas investigaciones incluyen habitualmente análisis de las piezas falladas, ensayos de materiales, estudio de antecedentes, declaraciones de testigos, etc. Con los resultados de estas investigaciones se define cuáles de las posibles causas pueden ser eliminadas del árbol.

En toda falla debemos encontrar siempre al menos uno de estos tres tipos de causas:

- Condición del sistema previa a la falla (material inadecuado, defecto de fabricación, etc.)
- Evento ocurrido al momento de la falla, y que contribuyó sustancialmente a ella.
- Barrera excedida: dispositivo de seguridad que ante la ocurrencia de un evento debió haber evitado la falla, pero no lo hizo (válvula de alivio, evaluación no destructiva, etc.)

A su vez, es habitual diferenciar a las causas raíz por su naturaleza. Definimos causas físicas (defectos), humanas (errores) y latentes (organizacionales).

Volvamos al ejemplo del naufragio del ferry Sewol en el mar de Corea en abril 2014, e intentemos un análisis RCA basado en la información periodística. La “Falla” definida

inicialmente fue: hundimiento del ferry. Pero luego del análisis, se puede definir una falla de mayor orden: la pérdida de 300 vidas, de la que el hundimiento es una de las causas inmediatas (un evento). Como causas raíz de índole física, se pueden definir:

- fuertes corrientes en la zona dificultaron la navegación
- Corrientes y giro brusco hicieron escorar al ferry
- El diseño de estabilidad dinámica no evitó el “rapidísimo” hundimiento

A las Causas Raíz de índole humana las podemos separar ahora en dos grupos. Por un lado, las involucradas en el hundimiento:

- reciente remodelación para añadir capacidad comprometió su estabilidad.
- estaba también fuertemente sobrecargado y sin suficiente agua de lastre.
- tripulación decidió giro de 15 grados, más agudo que lo aconsejable
- En ese momento el capitán no estaba al mando, sino un tercer oficial

Las Causas Raíz de índole humana involucradas en la pérdida de 300 vidas:

- Mensaje anti pánico: “quédense donde están” (y sociedad obediente...)
- Capitán y oficiales no ejercieron su deber de asistencia y alivio, (priorizaron sus propias vidas).
- Mal manejo inicial del desastre y esfuerzos de rescate

### **3. FALLAS POR SCC EN TUBERÍAS ENTERRADAS**

Hasta 1990 no había habido ningún registro de fallas por corrosión bajo tensiones (stress corrosión cracking, SCC) como causa de fallas en las tuberías argentinas. Con la edad de las tuberías este mecanismo comenzó a tener un impacto importante sobre la confiabilidad. Varias explosiones fueron atribuidas a mecanismos de falla por SCC de alto pH y la repentina propagación de grietas longitudinales en la superficie exterior de los tubos de [4].

SCC es un término usado para describir fallas en servicio que se producen por lenta propagación de grietas. Este fenómeno se asocia con una combinación de esfuerzo (aplicado o residual) por encima de cierto valor umbral, un medio específico y condiciones metalúrgicas, que conducen a fisuras superficiales con una alta relación de aspecto (largas y superficiales). SCC ha sido reconocido como una causa de fallas en líneas de transmisión de petróleo y gas de alta presión desde mediados del 60. Se han identificado dos formas de SCC: de alto pH o “SCC clásica” y de “bajo pH o casi-neutro” [5] [6]. Ambos tipos de SCC sólo se han observado bajo recubrimientos despegados y cuando el esfuerzo tiene una componente fluctuante.

La forma de alto pH es la más conocida en Argentina, más de 20 casos de fallas o incidentes fueron reportados en Argentina debido a este mecanismo. SCC de alto pH en tuberías se caracteriza por la presencia de parches o colonias de numerosas grietas intergranulares y muy finas, generalmente muy superficiales y poca evidencia de corrosión. Esta fisuración está asociada con soluciones relativamente concentradas de carbonato – bicarbonato [7] con valores de pH de aproximadamente 9. La tasa de crecimiento de este tipo de SCC depende exponencialmente del nivel de temperatura y el esfuerzo. Debido a esto, el número de fallas cae notablemente con el aumento de la distancia a las estaciones de bombeo y compresión. La protección catódica (CP) y los revestimientos despegados desempeñan un papel importante en estas fallas.

Algunas características típicas de estas fallas son: colonias de grietas intergranulares y ramificadas, una considerable concentración de carbonatos y bicarbonatos en el suelo, una película negra de magnetita que cubre la superficie de fractura en los sitios de iniciación, alta temperatura y esfuerzo en la pared de la tubería, y potencial electroquímico en el rango normal de protección contra la corrosión. La **Fig. 1** es un ejemplo de una colonia de SCC, la fractura criogénica muestra una clara evidencia de la típica forma de las grietas en la superficie externa de la pared del tubo.

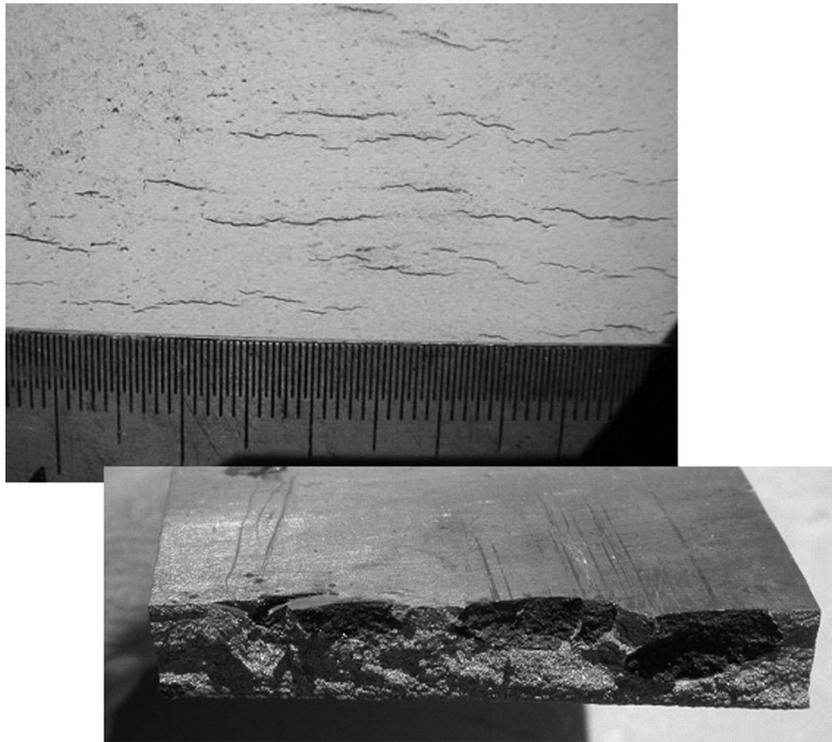


Figura 1. (a) colonia de fisuras por SCC. (b) luego de apertura criogénica [4].

La eventual fractura en servicio ocurre generalmente por el mecánico desgarramiento del ligamento, cuando la sección de la pared es tan reducida que ya no soporta la presión interna.

El consiguiente crecimiento rápido de la fractura (reventón) se detiene cuando la reducción de la presión interna debida a la fuga reduce el esfuerzo por debajo de la fuerza impulsora necesaria para la propagación de la fractura. La longitud de la fractura definitiva está relacionada con la relación entre las velocidades de propagación de la fractura y de reducción de la presión. La velocidad de crecimiento de grieta es controlada por la resistencia a la fractura del material, y la tasa de liberación de presión es controlada por la compresibilidad del fluido. En oleoductos, esto ocurre cuando las longitudes de fractura son del orden de un metro, mientras que para gas natural las fracturas son generalmente de 20 a 50 metros de largo. Aquí, las cargas dinámicas debido al chorro del gas fugando y a veces a su detonación producen grandes las deformaciones en la tubería. En cualquier caso, las fracturas suelen detenerse a poca distancia de las soldaduras circunferenciales.

Las medidas de mitigación más comunes incluyen el uso de modelos en los que las condiciones de servicio y ambientales se correlacionan con el fin de definir las zonas más propensas a localizar daños por SCC, y la inspección no destructiva, ya sea con herramientas de inspección interna (ILI) o evaluación directa de la superficie exterior. Según la gravedad del daño, las secciones dañadas se reparan por amolado y repintado, o mediante la sustitución de las extensiones defectuosas. La vacuna más eficaz contra SCC incluye pruebas hidrostáticas periódicas a altas tensiones (típicamente cerca de fluencia del material de la tubería). Con esto, el operador se asegura por un lado que ningún defecto crítico sobrevivirá, puesto que fallará durante la prueba; y por otro lado, que las fisuras por SCC y otras discontinuidades

que sobrevivan queden inmersas en una zona deformada plásticamente que induce tensiones residuales compresivas. Este tipo de pruebas se repite a intervalos durante la vida útil de la tubería (normalmente cinco años) y se complementa con inspecciones periódicas específicas [8].

La necesidad de alta temperatura hace que en el mundo la mayoría de las faltas por SCC ocurran en los primeros 20 km aguas abajo de una estación de compresión. Pero los suelos argentinos tienen baja conductividad térmica, por lo que se han encontrado fallas por SCC hasta 100 km aguas abajo de una estación de compresión [9]. Más fiables son los datos geográficos relacionados con tierras bajas planas, donde las condiciones de humedad cambian en ciclos anuales, resultando en la concentración de carbonatos bajo revestimientos despegados por la evaporación periódica de las aguas subterráneas.

El reemplazo del revestimiento (recoating) es relativamente caro, pero ha sido la solución elegida en los últimos años, porque no requiere la interrupción del servicio. Se han encontrado recientemente algunos problemas con esta solución, en particular en tuberías viejas, debido a la poca resistencia de las soldaduras entre tubos y en derivaciones, que en algunos casos fallaron cuando la tubería fue desenterrada y colgada para el repintado [10].

#### **4. TUBOS ERW DE BAJA FRECUENCIA**

Las soldaduras longitudinales generan concentración geométrica de esfuerzo, tensiones residuales y cambios metalúrgicos. Las tensiones residuales transversales son aproximadamente la mitad de la resistencia a la fluencia del metal base. Las soldaduras de arco sumergido (DSAW) tienen una historia mucho mejor de fiabilidad en tuberías viejas, en comparación con las soldaduras de resistencia eléctrica (ERW). En áreas de alta consecuencia se requieren evaluaciones de integridad especiales para abordar los problemas de defectos en las soldaduras ERW de baja frecuencia [11].

Los tubos ERW son soldados por calentamiento eléctrico (hoy de alta frecuencia) y compresión de ambos bordes a unir. Después de enfriada la soldadura, queda una distribución circunferencial de tensión residual, con tracción en la superficie exterior, donde generalmente se inician fisuras u otros defectos por SCC, corrosión, fatiga u otros mecanismos.

Típicamente asociados a soldaduras ERW de baja frecuencia aparecen defectos debidos a fusión incompleta, inclusiones, falta de fusión, etc. en la zona media de la soldadura [12]. Una forma típica de defecto es el “hook crack”, una grieta en gancho inclinada siguiendo los planos de laminación y en general a partir de inclusiones no metálicas mayores a lo aceptable, estos defectos en la chapa son denominados laminaciones o exfoliadas.

Las laminaciones más grandes encontradas en material base del tubo reducen la presión admisible menos del 25%, mientras que estos mismos defectos asociados a la soldadura reducen la resistencia hasta en un 50% [13]. Estos resultados demuestran que la localización del defecto es más importante que su tamaño, la razón principal es la poca tenacidad de la soldadura [[14]] y la dirección del defecto en dirección normal a las tensiones principales en la tubería.

Durante el proceso de soldadura, se expulsa el material calentado desde el centro hacia la superficie del espesor. El material expulsado se elimina mecánicamente con una herramienta de corte, en un proceso llamado afeitado. Defectos de laminación, originalmente paralelos a la superficie, son reorientados a través del espesor. La Fig. 2 muestra la sección transversal de una soldadura ERW. La línea vertical clara es la unión soldada, las bandas metalográficas originalmente horizontales se curvan en cada lado de la soldadura. Obsérvese cómo la pequeña grieta en la superficie del tubo en la parte inferior de la foto sigue un sendero metalográfico, típico de una grieta de gancho.

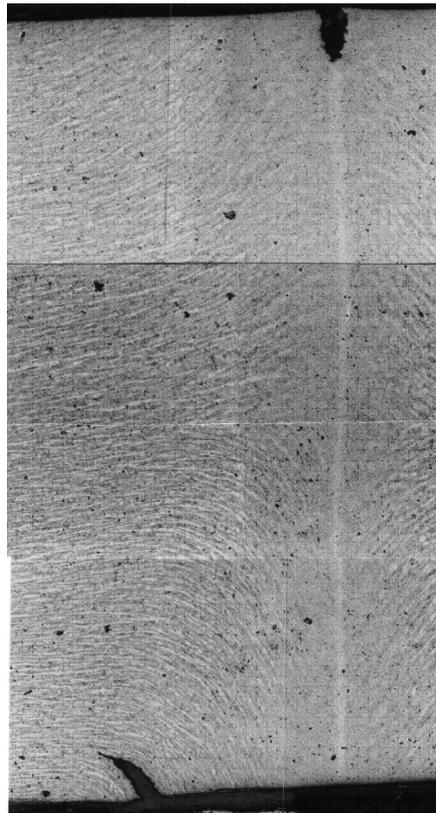


Figura 2. Corte transversal de una soldadura ERW de baja frecuencia (X25) [13]

El afeitado deja además marcas en las superficies que funcionan como áreas de posible iniciación de fisuras. La deformación plástica subsuperficial debida al afeitado crea también un estado local de tensiones residuales en la dirección del espesor. Las marcas superficiales y las tensiones residuales influyen en las condiciones para la iniciación de SCC [15], La susceptibilidad de las soldaduras ERW es mucho mayor que la del metal base. Las presiones umbral para inicio de daño por SCC para estas líneas están controladas por las soldaduras ERW. Para el caso estudiado esto representa alrededor del 70% de la longitud de la tubería estudiada.

## 5. MATERIALES E HISTORIA DE OPERACIÓN DESCONOCIDOS

Uno de los efectos secundarios de la privatización de los 90's fue que gran cantidad de información se perdió en el proceso. Los sistemas antiguos no estaban bien organizados, y durante la entrega de algunas empresas los datos se perdieron y en algunos casos fueron saboteados. Como resultado, los nuevos operadores no tenían un conocimiento razonable de las condiciones de gran parte de sus tuberías. Esto dio lugar a algunas fallas tempranas que llevó a esfuerzos de investigación adicionales para los nuevos propietarios.

Un caso interesante es el del (probablemente) único caso documentado de una falla por fatiga en un gasoducto [16]. La propagación súbita de una fractura en la soldadura DSAW provocó una explosión en un gasoducto de 24" de 45 años de edad. Curiosamente para

gasoductos, se comprobó que una grieta había propagado por fatiga, a partir de un defecto de falta de fusión en la soldadura. Este defecto de fabricación fue debido a una falta grave de alineación durante la soldadura.

Inspecciones previas no pudieron detectar el defecto geométrico, y no se encontró evidencia de abolladuras u otros daños por terceros. El rápido rescate de las muestras en el sitio de iniciación permitió tener superficies de fractura en muy buenas condiciones, y permitió recuperar buenos detalles fractográficos de la historia de la propagación de la falla.

Debido a grandes discrepancias entre los cálculos previos de vida a la fatiga y lo que la empresa consideraba la historia de presiones de la tubería, se realizaron investigaciones experimentales para caracterizar la propagación por fatiga en el metal de soldadura. Se demostró que en los primeros años de vida de la línea habían ocurrido muchos más ciclos de presión que lo esperado. Las hipótesis más razonables para estos ciclos de presión en este gasoducto se refieren al uso de la línea como almacenamiento para lidiar con grandes variaciones en el consumo de gas durante el día (“line-pack”).

Otro problema enfrentado después de las privatizaciones fue asegurar la aptitud para el servicio de algunas líneas, debido a la falta de información sobre sus materiales. La técnica ABI (automated ball indenter) es una prueba no destructiva para determinar la resistencia a la fluencia de las tuberías in-situ [17]. La prueba consiste en una muesca o indentación de punta esférica, iterada en unos pocos ciclos, mientras se registra carga y desplazamiento con alta precisión y linealidad. Esta información se utiliza luego para definir la curva tensión – deformación del material.

## **6. INTEGRIDAD DE REPARACIONES**

Así como para la construcción, las viejas tecnologías también fueron deficientes en cuanto a criterios de reparación. Un reventón serio seguido por un incendio ocurrido en 1998 provocó la muerte de 9 empleados que trabajaban en la reparación de la tubería. ENARGAS, el ente regulador argentino de gas natural, condujo una investigación durante el verano 98/99, [18]. En la sección malograda se detectaron picados profundos que propagaron una grieta longitudinal dúctil. Los picados eran largos y estrechos, con agujeros y mesetas típicos de las picaduras por corrosión inducida microbiológicamente (MIC). Estos picados habían sido detectados por ILI un año antes, la explosión se produjo cuando la sección estaba siendo preparada para su reparación.

Esta sección de la tubería tenía un historial de daños por MIC y había sido ya sometida a reparaciones. La falla se produjo en una zona con tubos de tres materiales diferentes. El original se remonta a la fecha de fabricación del entonces oleoducto (1978), un segundo material de mayor resistencia fue incluido en una reparación de 1992. El material en la sección malograda tenía características intermedias, probablemente proveniente de una reparación anterior, no registrada.

Este ejemplo apunta nuevamente a pobres procedimientos de operación y mantenimiento. Al terminar todas las medidas de acción legal, el origen del extraño picado podría atribuirse a un procedimiento de mantenimiento. Las posiciones de las indicaciones aportadas por el ILI se refieren a la soldadura circunferencial más cercana. Después de exponer el tubo, la soldadura solía ser detectada cortando axialmente el revestimiento con una trincheta (cutter), hasta detectar el refuerzo de las soldaduras. Al parecer, en este caso el corte original erro el blanco, y una vez que se completó la reparación, el revestimiento no fue reparado. En ese ambiente muy agresivo, en la muesca expuesta se desarrolló MIC muy rápidamente.

Un par de fallas durante los 90´s estuvieron relacionadas con un inadecuado diseño e instalación de parches de reparación y soldaduras de filete de mala calidad ver por ejemplo

la Fig. 3 [19]. Después de una extensa revisión de datos ILI, se encontró que durante muchos años se habían utilizado extensamente parches soldados por filete en tuberías de gas y petróleo [20] [21]. Los problemas más comunes asociados con estas fallas son:

- muy pobre resistencia a través del espesor del acero de tubos viejos, debido al severo bandeado microestructural,
- altos niveles de impurezas, inclusiones no metálicas alineadas y a veces también defectos de laminación
- altas tensiones en el sentido del espesor en el talón de las soldaduras longitudinales de los parches
- defectos de soldadura, en su mayoría socavaduras y faltas de fusión.

Los operadores todavía tienen que lidiar con muchas reparaciones de las cuales se conoce poco. Se utilizan técnicas de ILI para detectar y clasificar la criticidad de las “reparaciones”. En la evaluación de confiabilidad de tuberías añejas es fundamental evaluar si la condición de estos parches para definir la probabilidad de fallas, y cuando la probabilidad es alta, para definir y planificar futuras acciones preventivas y correctivas. Pruebas experimentales y simulaciones numéricas [[22] han permitido establecer un ranking de fiabilidad de parches. Los parches con mayor riesgo son aquellos que tienen las siguientes características:

1. Se colocaron con la tubería a una presión inferior a la mitad de su presión de diseño.
2. Fueron colocados para reparar un defecto de grandes dimensiones y más profundos que el 40% del espesor nominal del tubo.
3. Son rectangulares, dos veces más largos que anchos.
4. La calidad de las soldaduras es pobre o dudosa, por ejemplo, no hay registros de los procedimientos o ensayos no destructivos.

La información de las herramientas de inspección interna (ILI) no permite en general una evaluación de la calidad de la soldadura utilizada en la reparación, de la presión a la que fue hecha la reparación, ni del tamaño del defecto que motivó la colocación del parche. Por lo tanto, los datos del ILI permiten solamente evaluar la forma geométrica del parche. El operador del gasoducto no puede proceder a la sustitución inmediata de todos los parches detectados en una tubería, por lo que se establece un criterio de priorización. De este modo se han reducido notablemente las fallas debidas a reparaciones incorrectas, y continuamente se introducen nuevas metodologías para garantizar la confiabilidad de las reparaciones.

Los procedimientos de reparación modernos confían en el buen control de las variables de soldadura y en evitar la creación de discontinuidades longitudinales en la superficie de la tubería. Cuando no es posible reemplazar el tramo defectuoso, se repara mediante el uso de refuerzos de unión recta o camisas [23] En estas reparaciones, dos medias cañas son colocadas

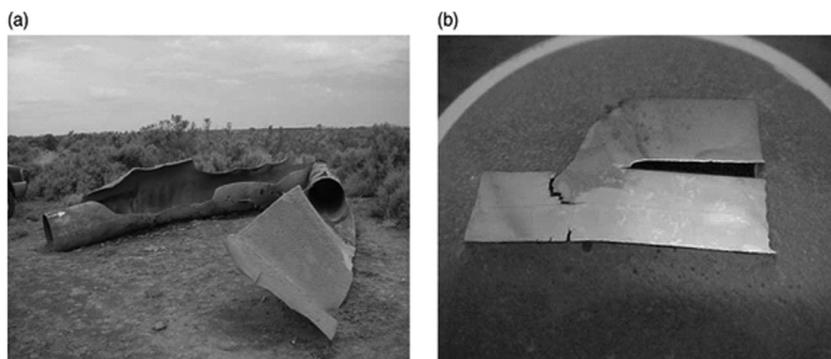


Figura 3. (a) Reventon en un gasoducto de 24”, iniciado en un parche rectangular soldado (b).

sobre el caño, y soldadas longitudinalmente entre ellas, eliminando la soldadura longitudinal al tubo. Sin embargo, varias de las primeras reparaciones de este tipo también han fallado durante el servicio, debido a pobres estándares de fabricación [24].

Otros riesgos relacionados con la soldadura de refuerzos de unión recta es la perforación del tubo durante la reparación, y en el otro extremo de la línea de tiempo, el eventual colapso de la pared del tubo bajo el refuerzo. El colapso por presión externa de la pared del tubo bajo estos refuerzos se asocia con roturas y salidas de servicio que causan la brusca despresurización de las tuberías de gas. Aunque estos defectos no representan un riesgo inminente de falla, deben ser eliminados porque impiden el paso normal de la herramienta de ILI.

Investigaciones recientes permitieron evaluar las causas de la aparición de estos defectos y optimizar medidas para minimizar su ocurrencia. [25].

Con el fin de minimizar la repetición de estos tipos de falla, se introdujeron una serie de cambios, incluyendo mejoras en la fabricación de las camisas y su instalación en campo, especificaciones de ensayo no destructivo y determinaciones de mínimo espesor soldable para evitar la perforación del tubo [26], y el uso de relleno intersticial epoxi para minimizar el riesgo de fallas en la camisa y el colapso plástico de la tubería [27].

Aunque la integridad de cada reparación parece ahora estar bien documentada, una nueva preocupación surgió respecto de la integridad estructural de los ductos con múltiples reparaciones. Los estudios incluyeron pruebas de experimentales a escala completa y modelado mecánico. Se ha definido que la fiabilidad de una reparación está fuertemente influenciada por los procedimientos de construcción, pero que los efectos de interacción entre sucesivas reparaciones no son apreciables si las reparaciones están separadas por más que un diámetro de tubería [28], [29].

El fenómeno de colapso por presión externa está ocurriendo ahora también en reparaciones en las cuales se coloca una manguera de material polimérico (“liner”) por dentro de los tubos degradados. Los parámetros que definen su ocurrencia son conceptualmente similares a los de los refuerzos de acero, pero se suman los efectos sobre la resistencia de material del “liner” de la temperatura y la química del fluido transportado [30].

## **7. INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS DEMOGRÁFICOS**

Algunos de los principales gasoductos de distribución en Argentina tienen más de 50 años. Los problemas de integridad de estas tuberías están relacionados no sólo a los materiales y daño de servicio, sino también a la forma en que la expansión demográfica ha afectado las condiciones en algunas áreas metropolitanas, más notablemente alrededor de la ciudad de Buenos Aires. La multiplicación (a veces incontrolada) de viviendas alrededor (y a veces a lo largo) del derecho de vía ha influido en los requisitos de integridad de las tuberías de varias maneras:

1. Reducción del riesgo aceptable de fallas: esta es una grave carga para los equipos de integridad, especialmente en áreas suburbanas, donde gran parte de las tuberías no son “piggeables” (no se puede pasar el ILI).
2. Consecuencias aumentadas de eventuales fallas en plantas de tratamiento y compresoras, debido al aumento de los requisitos de producción y limitaciones de espacio
3. Un mayor riesgo de daños por terceros: en particular, la tasa de fallas debido al uso incorrecto del suelo suburbano (la tasa de fallas por manipulación fraudulenta y robos de fluido no ha sido tan alta como en otras partes del mundo [31])
4. Cambios en las condiciones del suelo.

Esta última amenaza a la integridad de la tubería ha resultado inesperada. Algunas experiencias en los últimos 5 a 10 años por varios operadores revelaron que los movimientos del suelo y la transferencia de carga del suelo a la tubería juegan un papel importante en

la integridad de la tubería. Las tuberías enterradas son estructuras que interactúan con la tierra que las sostiene. Se sabe que cuando se implantan en áreas inestables, las tuberías pueden ser sometidas a cargas adicionales transmitidas por el movimiento de la tierra. Un par de fallas relacionadas con el suelo suburbano bonaerense, sin embargo, ocurrieron en suelos muy estables.

Ahora se entienden las razones de la acumulación de deformaciones y tensiones axiales en estos ductos como consecuencia de la historia del desarrollo urbano, en tres aspectos principales:

1. Carga superficial y movimientos del suelo
2. Cambios en la humedad del suelo,
3. Cambios cíclicos de temperatura alrededor de la tubería,

El primer aspecto es obvio, los otros dos requieren de explicación. Las tuberías fueron construidas originalmente en áreas sin asentamientos urbanos. Los primeros habitantes (en su mayoría de bajos ingresos) en las cercanías crearon una interferencia con las condiciones del suelo original casi insignificante. Se sacaba agua dulce de pozos y se desechaba en las cámaras sépticas, con lo cual el contenido total de agua del suelo se mantuvo constante. Eventualmente, estos asentamientos fueron conectados a un sistema central de agua potable, y en un momento diferente (a veces después de muchos años) fueron conectados a un sistema de cloacas. Hubo grandes intervalos en los que hubo un ingreso neto de agua en el suelo, lo que incrementó su humedad.

Es bien sabido que la saturación del agua cambia dramáticamente las propiedades mecánicas del suelo: el suelo seco es órdenes de magnitud más resistente que el suelo húmedo. Esto se convirtió en un problema cuando se acopló la tercera condición: cuando la población local empezó a usar gas de estas líneas de interconexión de la distribución, el flujo de gas cambio cíclicamente con el uso domiciliario, que ha sido en su mayoría relacionado con la calefacción y por lo tanto tiene un ciclo anual. Ciclos de cambio de flujo indujeron a su vez ciclos de temperatura en la tubería y el suelo circundante, generando gradientes de tensión térmica. Estas deformaciones axiales cíclicas en la tubería, acoplada con los ciclos antes mencionados en la resistencia al corte del suelo, probablemente crearon pequeños ciclos de tracción y compresión axial, cuyo efecto acumulativo eventualmente llevó a altos esfuerzos axiales en ciertas zonas de las tuberías.

Asegurar la integridad de la tubería depende, en parte, de la cuantificación correcta de las cargas inducidas en la tubería por el suelo [32]. En zonas con inestabilidades reconocidas se utilizan ahora extensómetros de alambre vibrante, colocados en la pared del tubo para evaluar las componentes axial y de flexión de las cargas (en rigor, deformaciones) transmitidas a la tubería. Los valores límite se fijan como niveles de alarma para indicar cuándo llevar a cabo obras correctivas y / o aliviar el esfuerzo. La Fig. 4 muestra un ejemplo del monitoreo de deformaciones en un gasoducto. Se observa el efecto sobre las deformaciones de una maniobra de zanjeo para relajación de tensiones, realizado en el “mes 8”.

Existe una limitación de este enfoque cuando se aplica a instalaciones existentes, en servicio durante algún tiempo. La condición de esfuerzo de la tubería cuando se colocan los medidores es generalmente desconocida. Hay por lo menos dos maneras de aliviar esta dificultad: uno es el uso de herramientas inerciales que permiten comparar la geometría actual de la tubería con una condición anterior (“as built”). Los cambios en las curvaturas y desplazamientos laterales pueden introducirse en un modelo y definir así el estado actual de tensiones. Otra forma más directa, es utilizar una técnica de medición de tensiones residuales, como el método del “agujero ciego”.

Los requisitos de logística, personal y maquinaria son muy importantes en lugares de difícil acceso, por lo que su costo es alto. Por esta razón, la colocación adecuada de los

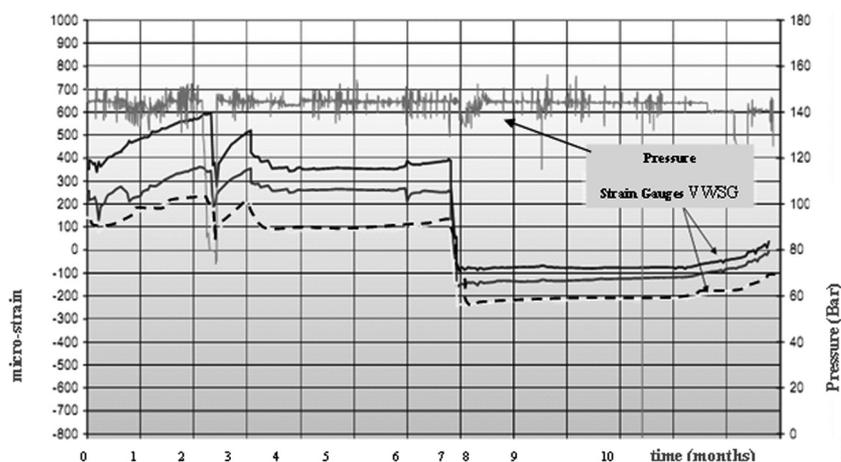


Figura 4. Tendencia en la deformación axial de una tubería enterrada

sensores y el seguimiento apropiado de deformaciones es, sin duda, una importante variable para decidir una intervención para aliviar esfuerzos. A este propósito, la herramienta clave es, sin duda, la simulación numérica de la interacción suelo ducto [33].

## 8. OBSERVACIONES FINALES

Como en todos los países, las amenazas más frecuentes para la integridad de las tuberías de gas y petróleo en la Argentina son la corrosión y el daño por terceros. Para contribuir a orientar los esfuerzos de los operadores y organismos de regulación para aumentar eficazmente la confiabilidad de las tuberías, el autor define las características particulares de los mecanismos específicos de daño más relevantes. Estos mecanismos se refieren a las tuberías enterradas en suelo estable: SCC de pH bajo, tubos con costura ERW de baja frecuencia, pérdida de datos sobre material y operación, viejas reparaciones y cambios demográficos a lo largo de los derechos de vía.

## REFERENCIAS

- [1] J.L. Otegui: Damage mechanisms in South American pipelines - 1st IGU WOC 3 Study Group Meeting. Oct. 24-26, Mar del Plata. International Gas Union, 2012.
- [2] J L Otegui. Challenges to the integrity of old pipelines buried in stable ground.. Eng. Fail. Analysis, ISSN 1350-6307. Vol. 42, pp 311-323, 2014
- [3] J.L. Otegui: Análisis de Fallas: Fundamentos y Aplicaciones en Componentes Mecánicos. ISBN 978-987-1921-17-1, EUDEM, Argentina, 2013.
- [4] C. Manfredi, J.L. Otegui: Failures by SCC in buried pipelines. Eng. Fail. Analysis 9 (2002) 495-509
- [5] Hussain K, Shaukat A, Hassan F. Corrosion cracking of gas-carrying pipelines. Materials Performance 1988:13.
- [6] C. Manfredi, J.L. Otegui, J. Motylicki: A failure by SCC in an oil pipeline. 25th Seminar of equipment inspection. IBP, Sao Paulo, Brazil, Aug. 1998
- [7] Parkins RN, O'Dell CS, Fessler RR. Factors affecting the potential of galvanostatically polarised pipeline steel in relation to SCC in  $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  solutions. Corros Sci 1984; 24: 343-73
- [8] J.L. Otegui, P.G. Fazzini, E. Rubertis. High pressure tubes and vessels - safety aspects. Chapter 4 in "High Pressure Processes in Chemical Engineering". ISBN: 978-3-902655-08-12-7 Editor M. Lackner. ProcessEng Engineering GmbH, Vienna, 2010.

- [9] GIE 2302-01-11 Analisis de Causas de Reventon en Gto. San Martin PK 1290. TGS S.A., 2011
- [10] GIE 2202-05-11 Admisibilidad de Discontinuidades en Soldaduras Circunferenciales en Gasoducto Troncal. TGN S.A., 2011.
- [11] Kiefner F, et al. Failure analysis of pipelines. ASM Handbook, ASM International; 1997.
- [12] Otegui JL, Chapetti MD, Motylicki J. Fatigue assessment of an ERW oil pipeline. *Int J Fatigue* 2002;24:21-8.
- [13] P G Fazzini, A. P. Cisilino, J L Otegui. Experimental validation of the influence of Lamination defects in E.R.W. pipelines. *Int'l J Press Vess & Piping*, ISSN 0308-0161, Vol. 82, pp. 896-904. 2005
- [14] API STD 579 Fitness for Purpose. American Petroleum Institute, 2007.
- [15] P. Fazzini, J.L. Otegui: Experimental determination of stress corrosion crack rates and service lives in a buried ERW pipeline *Intl J. Pressure Vessels and Piping* 84 (2007) 739-748
- [16] P.G. Fazzini, J.C. Belmonte, M.D. Chapetti, J.L. Otegui. Fatigue assessment of a double submerged arc welded gas pipeline. *International Journal of Fatigue* 29 (2007) 1115-1124
- [17] J.L. Otegui, H. Kunert, M. Dasso, A. Estevez, A. Marquez. VIII CORENDE Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales. Campana, Argentina, Aug. 2011
- [18] GIE 46-12/98 Análisis de Falla en Gasoducto Norte, Reventón 11-12-98. Enargas, Argentine regulatory agency for natural gas, 1999.
- [19] Manfredi C, Otegui JL, Martins C, Menendez A.: Analisis de fallas en gasoductos: estudio de casos. Proceedings of conference IEV 98, Brasil; 1998. p. 80-5.
- [20] Kiefner JF, et al. Failure analysis of pipelines ASM handbook. St Paul, MN: ASM International; 1997.
- [21] GIE 8-10/97: Evaluación de las causas de tres fallas en gas pipeline norte. Transportadora de Gas del Norte S.A., Argentina; 1997.
- [22] P.G. Fazzini, J.L Otegui. Influence of old rectangular repair patches on the burst pressure of a gas pipeline. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 83 (2006) 27-34
- [23] Fitness-for-purpose assessment procedures for sleeve welds in pipelines. Welding Supervisory Committee, Pipeline Gas Association, AGA, PRC Project PR-185-014; 1994.
- [24] Otegui JL, Rivas A, Manfredi C, Martins C. Weld failures in sleeve reinforcements of pipelines. *Eng Fail Anal* (ISSN: 1350-6307) 2001;8-1: 57-73, 2007
- [25] J.L. Otegui, S. Urquiza, A. Rivas, A. Trunzo. Local collapse of gas pipelines under sleeve repairs. *Int'l Journal of Pressure Vessels & Piping*, ISSN 0308-0161, Vol. 77 No.9 (Aug), pp. 555-566. 2000
- [26] Minimum Thickness for Repair Girth Welds in Corroded Pipe J.L. Otegui, C. Manfredi, A. Cisilino, A. Trunzo. *Anales de CORENDE / IEV* 2000, pp. 91-98,
- [27] Chapetti MD, Otegui JL, Manfredi C, Martins C. Full scale experimental analysis of stress states in sleeve repairs of gas pipelines. *Int J Press Vessels Piping* (ISSN: 0308-0161) 2001;78(May):379-87.
- [28] Full scale experimental analysis of stress states in sleeve repairs of gas pipelines. M.D. Chapetti, J.L. Otegui, C. Manfredi, C.F. Martins. *Int'l Journal of Pressure Vessels & Piping*, ISSN 0308-0161, Vol.78 (May), pp.379-387, 2001.
- [29] J. L. Otegui, A. Cisilino, A. E. Rivas, M. Chapetti, G. Soula. Influence of Multiple Sleeve Repairs on the Structural Integrity of Gas Pipelines *Int'l J Press Vess & Piping*, ISSN 0308-0161, Vol 79, pp. 759-765. 2002
- [30] F. Rueda, J L Otegui, P.M. Frontini.: Numerical tool to model collapse of polymeric liners in pipelines. *Eng. Failure Analysis*, ISSN 1350-630, Vol. 20, pp. 25-34, 2012
- [31] P.Venturino, J. L.Otegui, M. Teutónico. Gas pipeline leakage in urban subsurface soil. *Procedia Materials Science* Vol.1 pp. 289 - 296; Elsevier Sc. 2012
- [32] P. Fazzini, J.L. Otegui, G. Douce, J.C. Marconi. Integridad de Ductos sometidos a esfuerzos Externos. 2 Congreso de Integridad en Instalaciones en el Upstream y Downstream de Petróleo y Gas, IAPG, Buenos Aires, May 20-22, 2014.
- [33] H Kunert, J L Otegui, A Marquez, P Fazzini. Nonlinear FEM strategies for modeling pipe-soil interaction. *Eng. Failure Analysis*, ISSN 1350-630, Vol 24 pp 46-56. 2012.



## **ERRORES EN INGENIERIA ¿Qué aprendemos de ellos?**

*L.A. de Vedia<sup>1</sup>, Carlos Lerch<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>e-mail: luisdevedia@gmail.com. Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires;  
Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

<sup>2</sup>e-mail: carloslerch@gmail.com. Universidad Nacional de La Matanza, Buenos Aires, Argentina.

*“The essays and lectures of which this book is composed are variations  
upon one very simple theme – the thesis that we can learn from our mistakes”*

*Karl Popper, Conjectures and Refutations*

### **Resumen**

La historia de la ingeniería registra éxitos y fracasos. Sin embargo, la enseñanza de la ingeniería reposa más en la experiencia que nos dejan los éxitos y no tanto en la enseñanza que dejan los fracasos. El propósito de este trabajo es analizar con algunos ejemplos tomados de aquella historia, que aprendizaje hacemos de los errores en ingeniería. La propuesta que se efectúa es rescatar el valor que estos últimos pueden tener para la educación del ingeniero. Los errores constituyen un aspecto inevitablemente vinculado al método de prueba y error y por lo tanto al avance del conocimiento por lo que su análisis puede constituir un recurso de enorme valor pedagógico que debería aprovecharse adecuadamente en la currícula de las carreras de ingeniería.

*Palabras clave:* errores en ingeniería, educación del ingeniero, didáctica del error.

### **Abstract**

#### **Errors in engineering: what we learn from them?**

The history of engineering is composed of successes and failures. However, teaching of engineering is mainly based on the experience left by successes and not so much on the instructional value of the failures. The purpose of this work is to analyze, through the consideration of some cases taken from that history, what learning we have obtained from engineering errors. The proposal made is to rescue the value those errors can have in the engineer education. Errors constitute an inevitable aspect related to the trial and error method and so also to the advance of knowledge. Because of this, their analysis may become a tool of great pedagogic value that should be properly exploited in the engineering curricula.

*Key words:* errors in engineering, engineer education, error didactic.

## **INTRODUCCIÓN**

Vivimos en una sociedad con baja tolerancia al error. Puede decirse que enfatizar los yerros del prójimo se ha constituido en un recurso frecuente para diluir los propios y de este modo poder sentirnos mejor respecto de quienes nos rodean, sea tanto en el ámbito laboral como familiar. En la sociedad anglo-sajona, particularmente en los Estados Unidos, la expresión “*looser*” (perdedor) se ha convertido desde hace algunos años en una de las más descalificantes, entendiéndose por “*looser*” a aquél que no tiene éxito en sus cometidos, es decir aquél que comete errores con frecuencia lo que hace que sus objetivos no se alcancen en la medida esperada.

Existen numerosos ejemplos que nos enseñan que esta actitud es desde todo punto de vista lamentable, es decir que esta actitud de condenar de tal modo el error, esta intolerancia al error, es precisamente un gran error. Resulta paradójico que en la concepción popular, que por un lado critica a quienes cometen errores, se acepta que una persona es “*sabia*” cuando aprende de sus errores. De modo que si el error puede ser fuente de sabiduría, ¿cuál es la

razón para denostar sin misericordia a quién lo comete? Surge de esto que lo significativo, no es tanto el error en sí, sino lo que se obtiene del mismo. Debemos primero tener en cuenta que no todos los errores pueden ser igualmente capitalizables y en este sentido podemos hacer una distinción importante en el origen de los mismos que tiene que ver con la manera en que tales errores se producen. Una de estas maneras está constituida por lo que podríamos llamar el “*error accidental*” o “*error azaroso*” que puede conducir a veces imprevistamente a resultados valiosos. Existen varios ejemplos de este tipo de error en la historia de la ciencia y la tecnología.

Es conocida la historia de los sucesos que condujeron a Sir Alexander Fleming al descubrimiento de la penicilina. El descuido de ciertas prácticas de laboratorio permitió la contaminación de un cultivo que condujo al crecimiento de esporas en el mismo. Efectivamente, en setiembre de 1928 Fleming estaba realizando varios experimentos en su laboratorio y el día 22, al inspeccionar sus cultivos antes de destruirlos notó que la colonia de un hongo había crecido espontáneamente, como un contaminante, en una de las placas de Petri sembradas con *Staphylococcus aureus*. Fleming observó más tarde las placas y comprobó que las colonias bacterianas que se encontraban alrededor del hongo (más tarde identificado como *Penicillium Notatum*) eran transparentes debido a una lisis bacteriana (muerte de las bacterias). *Penicillium* resultó un moho que produce una sustancia natural con efectos antibacterianos: la penicilina. Fleming comunicó su descubrimiento sobre la penicilina en el *British Journal of Experimental Pathology* en 1929.

Otro ejemplo conocido de error que condujo a una innovación tecnológica importante fue el descubrimiento accidental por Goodyear del proceso de vulcanizado, esencial para la fabricación de neumáticos. El vulcanizado es un proceso mediante el cual se calienta el caucho crudo en presencia de azufre, con el fin de volverlo más duro y tenaz. Fue descubierto por Charles Goodyear en 1839 por accidente, al volcar un recipiente de azufre y caucho encima de una estufa. Esta mezcla se endureció y se volvió tenaz, llamándose al proceso vulcanización en honor al dios Vulcano y fue el origen de la mundialmente famosa fábrica de neumáticos Goodyear en 1898.

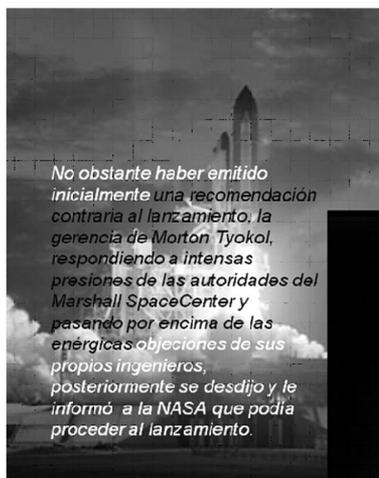
Estos son claros ejemplos de un error de origen accidental, es decir producto de un hecho azaroso como puede serlo la contaminación de un cultivo de bacterias o la caída accidental de un objeto y no un “*error de apreciación*” o “*error de juicio*” debido a una



incorrecta evaluación o incorrecta utilización de los datos disponibles para la solución de un problema. Los dos casos referidos tuvieron un impacto beneficioso de enormes dimensiones, el primero en la salud de la población mundial y el segundo en el transporte. Sin embargo, no es la clase de error al que nos referiremos aquí, que es el del segundo tipo, es decir al que llamaremos error de apreciación. Esta clase de error es el que se produce como consecuencia de una acción “deliberada” que finalmente no conduce al resultado esperado. La razón por la cual nos interesa analizar este tipo de errores es por un lado, porque es la clase de errores más frecuente, y por el otro, porque su dinámica es susceptible de tal análisis lo que permite extraer el máximo aprovechamiento de los mismos.

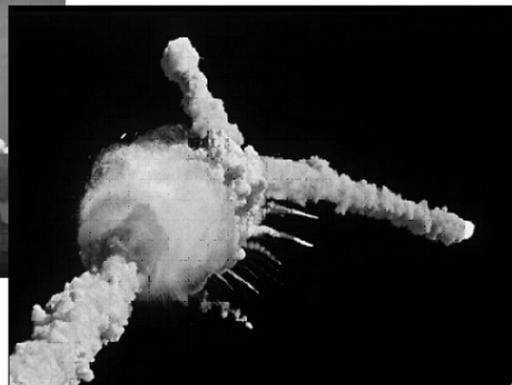
Dentro de los que estamos designando errores de apreciación cabe sin embargo una ulterior clasificación. Están aquellos errores de apreciación que se producen simplemente como consecuencia de una incorrecta selección o un inadecuado empleo de las variables de un problema, pero en los que la selección y empleo de tales variables se hace con el mejor conocimiento disponible. Hay por el contrario errores que son también en última instancia de apreciación, pero en los cuales la selección y manejo de las variables no responde al mejor conocimiento disponible sino que tal selección y manejo está teñida por cuestiones subjetivas que en última instancia impiden alcanzar el objetivo buscado. Lamentablemente, esas cuestiones subjetivas están muchas veces constituidas por presiones económicas y políticas, tanto individuales como corporativas, lo que puede conducir a claudicaciones éticas por parte de quienes tienen la responsabilidad de las decisiones. Un ejemplo particularmente trágico de esto último fue el desastre del transbordador espacial “Challenger” en Enero de 1980 y que resultó en la pérdida de la nave y de toda su tripulación.

Lo que no solemos reconocer es que el fracaso puede implicar en realidad un logro. Basta preguntarnos: ¿Habría fracaso si no hubiese un intento previo? Sólo puede evitarse cometer errores no haciendo nunca un intento. Con relación a esto, Sir K.Robinson [1] dice que todo proceso creativo pasa a través de varias fases, puede implicar falsos arranques, pruebas y errores, y una serie de aproximaciones sucesivas en el camino hacia el objetivo final. Ciertamente, esta no es la forma en que enseñamos a nuestros jóvenes futuros ingenieros a encarar la resolución de problemas. ¿Cuántas veces como docentes hemos encarado la



No obstante haber emitido inicialmente una recomendación contraria al lanzamiento, la gerencia de Morton Tyokol, respondiendo a intensas presiones de las autoridades del Marshall Space Center y pasando por encima de las enérgicas objeciones de sus propios ingenieros, posteriormente se desdijo y le informó a la NASA que podía proceder al lanzamiento.

***Errores de apreciación, pero resultado de decisiones tomadas bajo presiones corporativas, han conducido a trágicas consecuencias.***



solución de un problema que no conozcamos de antemano y para el que esa solución no se vaya desplegando en la pizarra de manera ordenada y aparentemente “natural”, en lugar de plantear un problema novedoso incluso para nosotros y explorar con nuestros alumnos las posibles estrategias para su solución que hallaremos luego de intentos fallidos, prueba y error? ¡Seguramente muy pocas veces!

Pocos días antes de la escritura de estas líneas, el periodismo dio cuenta de la aparentemente fallida prueba del vehículo espacial VEX1A, paso previo a la construcción del primer lanzador satelital argentino Tronador II (TII). Según el Director Ejecutivo de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales de la Argentina, Dr. Varotto [2], el TII debe ser capaz de colocar en órbita a 600 kilómetros de altura, y con gran precisión, masas de entre 250 a 300 kilogramos. Para ello se desarrollan vehículos experimentales para efectuar un conjunto de pruebas que permitan contar hacia fines de 2015 con un primer TII tecnológico. Desde ya, la tecnología que se está desarrollando para el TII permitiría, sin grandes variaciones según Varotto, modificar sus componentes para obtener versiones con capacidad para colocar en órbita masas significativamente mayores. De la lectura de las notas periodísticas, que dan cuenta de un fallido primer ensayo, podría interpretarse que la Argentina no está capacitada para el logro de un lanzador satelital nacional. Que podríamos decir entonces de los fracasos que la NASA sufrió en distintas etapas del programa espacial Apolo que terminó colocando una tripulación en suelo lunar, fracasos que condujeron incluso a la pérdida de vidas de astronautas, o de los desastres del trasbordador espacial Challenger y del Columbia que también condujeron a la pérdida de la vida de sus tripulantes. Por graves que hayan sido las consecuencias de estos errores, ¿debió la Nasa suspender sus programas? Ciertamente no lo hizo, procuró capitalizar los errores y los Estados Unidos se volvieron la mayor potencia aeroespacial de la historia.

De manera que la enseñanza es clara: los errores, si se analizan debidamente, constituyen un recurso invaluable para ampliar el conocimiento. Estas consideraciones nos ubican en un aspecto central de nuestro análisis que se refiere al quehacer del científico y del ingeniero. Esto es: ¿hasta qué punto el método utilizado para entender y para controlar distintos aspectos de la naturaleza puede ser calificado de científico? En este sentido, es interesante rescatar algunos conceptos del Dr. Tad Boniszewski [3] quien considera que el conocimiento científico existe y como tal debe ser utilizado como guía o inspiración, pero que muchas investigaciones deberán realizarse auxiliándose con el método de “prueba y error” sin que haya nada censurable en ello. Como ejemplo menciona el hecho de que si bien la ciencia de la nutrición es suficiente para establecer una dieta adecuada para las personas, es totalmente incapaz de diseñar por sí sola comidas agradables al paladar, y agrega: *“aquellos que no hayan aprendido la lección del papel limitado que la ciencia ha jugado en la creación de riqueza y en la vida económica, no están en condiciones de crecer”*.

Según D.G. Mayo [4], la idea de que aprendemos de los errores, aunque constituye un lugar común, ha sido poco explorada en el ámbito de la filosofía de la ciencia. En efecto, cuando los filósofos de la ciencia hablan de aprendizaje a partir de los errores, a lo que se refieren generalmente es a una hipótesis que fracasa al ser expuesta a la prueba experimental, lo que conduce eventualmente a su rechazo y reemplazo por otra alternativa. Poco se dice en cambio de los distintos tipos de errores que pueden acontecer, qué es lo que específicamente se aprende cuando se reconoce un error, cómo identificamos con precisión donde surge el error, cómo se incrementa nuestra capacidad para detectar y corregir errores, y de qué modo este aumento puede estar vinculado a nuestro conocimiento científico.

## ERRORES DE INGENIERÍA

### El caso de la sonda NASA marciana y la nave insignia de la escuadra sueca:

La sonda *Mars Climate Orbiter*, de más de 300 kg de peso, fue lanzada en Diciembre de 1998 para estudiar la atmósfera del planeta Marte. Unos 10 meses más tarde, cuando el vehículo espacial estaba por comenzar su inserción orbital, se interrumpe la comunicación radial con la nave que termina desintegrándose en la atmósfera marciana. Lo que ocurrió fue que el software de la computadora terrestre emitía datos en unidades inglesas en lugar de hacerlo en unidades métricas SI, que era el sistema acordado por contrato entre la NASA y la empresa Lockheed. Mientras la computadora de tierra instruía a la computadora de la nave sobre el ajuste de los impulsores en libras-segundo, la nave procesaba estos datos como si fueran Newton-segundo. Debido a esto, la órbita a la que se dirigió la sonda era de 57 km en lugar de los 140-150 km inicialmente previstos. La mayor densidad de la atmósfera a aquella altura produjo la desintegración del equipo. El costo de la sonda era de unos 125 millones de dólares pero el costo total de la misión habría alcanzado los 600 millones de dólares. Podemos aquí preguntarnos qué tuvo que ver este acontecimiento con la nave insignia de la escuadra sueca.

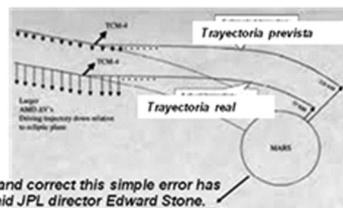
En 1628, se produjo la botadura del VASA, un nuevo buque de guerra armado con 64 cañones, que sería la nave insignia de la escuadra sueca. A poco de la botadura y a sólo un par de km de la costa, la nave se escoró por un viento lateral y zozobró llevándose consigo la vida de 50 tripulantes. La nave permaneció sumergida durante más de tres siglos hasta que en 1961 fue rescatada de las aguas frías y poco salobres del estuario y hoy puede visitarse en el museo VASA de Estocolmo constituyéndose en la nave más antigua mejor conservada. Los arqueólogos han encontrado cuatro reglas usadas por los constructores: dos estaban calibradas en pies suecos, que tenían 12 pulgadas, mientras que otras dos medían pies de Amsterdam, con 11 pulgadas [5], lo que da pie a la conjetura que la inestabilidad de la nave pudo deberse a una asimetría constructiva producto de la utilización de distintas unidades de medida.



El Vasa, buque insignia de la armada sueca, hundido a poco de su botadura, Estocolmo, 1628. (Museo Vasa, Estocolmo)



La sonda Mars Climate Orbiter, lanzada en Diciembre, 1998.



"Our inability to recognize and correct this simple error has had major implications," said JPL director Edward Stone.

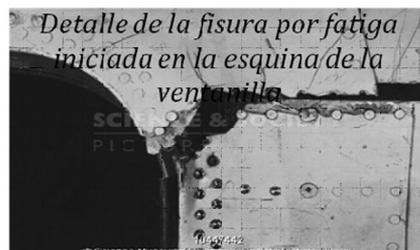
De un artículo por Kathy Sawyer  
Washington Post Staff Writer  
Friday, October 1, 1999; Page A1

Si bien es probable que el naufragio del VASA tuviese más que ver con su elevado centro de gravedad que con una confusión de unidades de medida, los dos casos anteriores dejan alguna enseñanza importante. Los errores no se debieron en todo caso a un criterio técnico incorrecto. Cuando la computadora de la NASA situada en tierra elaboraba sus datos, no había error de programación y los datos generados eran correctos. Sólo estaban dados en un determinado sistema de unidades. Cuando la computadora a bordo de la sonda procesaba esos datos, tampoco lo hacía incorrectamente, sólo que lo hacía en otro sistema de unidades. Era como dos interlocutores que no se entienden por hablar diferentes idiomas pero en los que cada uno dice cosas razonables. El problema que llevó a la desintegración de la sonda en la atmósfera marciana y quizás al naufragio del VASA, no fue un error estrictamente técnico sino un error que hoy llamaríamos de *gestión de calidad*.

### Los desastres de los De Havilland Comet y de la Alexander Kielland

El De Havilland Comet fue el primer avión jet de pasajeros del mundo, diseñado y construido en Gran Bretaña. Revolucionó el transporte aéreo, y era el orgullo de la industria de la aviación británica en su primer año, hasta el primero de los accidentes catastróficos

***De Havilland Comet, primer jet comercial, en vuelo. Este avión, de origen británico fue presentado en los primeros años de la década del '50. Lamentablemente, una serie de catástrofes interrumpió la producción y el servicio de la aeronave. Cuando los problemas fueron resueltos luego de, 5 años de estudios, los EE.UU. ya habían tomado la vanguardia en la aviación comercial de reacción (Boeing).***



que ocurrieron en 1953. El primer accidente ocurrió en Enero, cuando 29 pasajeros y una tripulación de seis personas perdieron la vida fuera de la isla italiana de Elba. El certificado de aeronavegabilidad del Comet fue retirado después de la segunda caída, sólo tres meses más tarde. Catorce pasajeros y siete tripulantes cuando el avión se estrelló en la costa cerca de Nápoles.

El análisis minucioso de los miles de fragmentos del Comet involucrados en el accidente de Elba reveló que el daño fue causado por una falla en el avión en sí y no debido a un acto de sabotaje como se sugirió inicialmente.

En lo que Sir Leonel, entonces Fiscal General en el Reino Unido, llamó “una de las piezas más notables de trabajo de investigación de falla jamás realizado”, un equipo dirigido por Sir Arnold Hall, director del Royal Aircraft Establishment en Farnborough, analizando modelos y aviones de tamaño completo sometidos a pruebas de presión hidrostática en un gigantesco tanque de agua construido para simular los cambios de presión resultantes de los decolajes y aterrizajes, sumado a la evidencia provista por un fragmento recogido de la escena del accidente que mostró que una grieta se había desarrollado debido a la fatiga del metal cerca de la ventana situada en la parte delantera del techo de la cabina permitió llegar a aquella conclusión.

Los investigadores descubrieron que una pequeña grieta como esta se extendería rápidamente bajo cambios de presión y llevaría rápidamente a una repentina y general desintegración del fuselaje. Después de la prueba concluyente que la fatiga se originaba en la concentración de tensiones en las esquinas de las ventanas del avión, todos los aviones fueron rediseñados con ventanas redondeadas.

Casi tres décadas más tarde, en el atardecer del 22 de Marzo de 1980, en el Mar del Norte, el tiempo se presentaba tormentoso, con una temperatura ambiente entre 4 y 6° C y con una temperatura del agua de unos 6° C. El viento era de unos 20 m/s y las olas alcanzaban de 6 a 8 m de altura. Pocos minutos después de las 18:30 Hs., la Alexander Kielland, una plataforma de explotación petrolera costa afuera convertida en plataforma de alojamiento, localizada en el Mar del Norte, comenzó a inclinarse y en 20 minutos se volcó completamente pereciendo 123 de sus 212 tripulantes.



La causa del desastre fue luego rastreada hasta un pequeño cordón de soldadura de filete de 6 mm de cateto que unía una brida destinada al montaje de un sonar con uno de los elementos estructurales principales de la plataforma. Irónicamente, el sonar para cuyo montaje la brida había sido instalada, hubiese sido requerido para tareas de explotación que la Alexander Kielland nunca realizó.

Las consideraciones sugeridas por la investigación posterior, pusieron en evidencia que tanto la selección del material para la conexión de la brida como la ejecución de las soldaduras se efectuaron sin los requisitos de calidad apropiados. El fatal error cometido por los constructores de la plataforma fue entender que la soldadura que uniría el elemento estructural principal a la conexión de soporte de la brida no estaba destinado a cumplir una función estructural sino meramente de soporte del sonar [6].

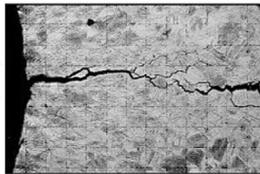
Si bien esto era esencialmente correcto, lo que se ignoró fue el hecho que una fisura puede crecer bajo cargas variables con tensiones relativamente bajas y una vez alcanzada la longitud crítica de Griffith, propagarse a alta velocidad a través de la estructura.

En virtud de esta omisión, el astillero responsable de la construcción obviamente relajó los requerimientos de inspección que había impuesto para las soldaduras consideradas estructurales.

De no haberlo hecho, sin duda un equipo idóneo hubiera evitado que los defectos de las soldaduras, de producirse, pasasen desapercibidos. Se pagó un altísimo precio por este error de apreciación: 123 vidas humanas y millones de libras esterlinas en pérdidas materiales.

#### **La fisuración de las vainas de los cartuchos de las tropas inglesas en la India y la falla en los magnetos superconductores del Large Hadron Collider (LHC).**

Como último ejemplo de la recurrencia de errores nos referiremos al problema observado por las tropas inglesas estacionadas en la India durante la colonización de este país por los británicos. En efecto, la llegada del Monzón con su carga de humedad y vapores amoniacales provenientes de los establos, producía la fisuración de las vainas de los cartuchos almacenados en los arsenales con su consiguiente inutilización. Fue una de las primeras evidencias de un fenómeno de degradación de aleaciones metálicas hoy conocido como *corrosión*



***Un siglo después el problema se repetía en uno de los ingenios de la más alta tecnología que el hombre ha construido: el LHC en el CERN, Suiza. Problemas de fisuración por SCC en canales de Cu de magnetos superconductores.***

***“Season cracking”, la forma de corrosión bajo tensiones que fisuraba las vainas de los cartuchos de latón en los arsenales de las tropas estacionadas en la India durante la dominación inglesa. Ocurría con la llegada del Monzón que traía vapores amoniacales húmedos provenientes de los establos.***



Cross section of a wire of 0.25 mm diameter, showing three fins of Ta-40 wt % Nb alloy, added to reduce the effective filament size.

*bajo tensiones* que puede afectar a la mayoría de las aleaciones de interés industrial si se dan las condiciones necesarias. El problema es todavía en la actualidad objeto de estudio por parte de los especialistas y se han establecido criterios de selección de materiales para reducir el riesgo de su aparición en distintos medios. No obstante este conocimiento que se desarrolló en casi un siglo de investigaciones sobre el tema, el mismo fenómeno afectó a los canales de cobre en los magnetos superconductores de una de las piezas de ingeniería más sofisticadas de los últimos tiempos: el LHC del CERN en Suiza.

Si bien hemos analizado sólo algunos casos de errores de los tantos que podemos encontrar en la historia de la ingeniería, surge del análisis que no parecería que hiciésemos un aprovechamiento cabal de los mismos. Sin embargo, se trata de casos que arrojaron una enseñanza importante que condujo a la modificación o al mejoramiento de procedimientos de gestión y de diseño. Hoy los proyectos de ingeniería, grandes y pequeños, se ejecutan en el marco de sistemas de aseguramiento de calidad que, entre otras cosas, regulan la forma en que debe fluir la información para evitar errores del tipo arriba mencionado. Por otro lado, accidentes como los ocurridos a los De Havilland Comet y a la plataforma Alexander Kielland, si bien de enorme costo en términos de vidas humanas y equipo, han conducido a un perfeccionamiento en los criterios de diseño de estructuras en lo que se refiere a su resistencia a la fatiga.

## LA “PEDAGOGÍA DEL ERROR”

Lo que aquí se sugiere es que el error en ingeniería, más allá de constituir un aspecto intrínseco de la exploración de terrenos desconocidos, puede constituirse en un recurso pedagógico de inestimable valor para la formación de los futuros (y actuales!) ingenieros. Como lo muestran en forma elocuente los ejemplos anteriores tomados casi al azar de la historia de la ingeniería, la desatención o el desconocimiento de detalles que pueden parecer menores en un primer análisis, puede implicar graves consecuencias. Esto hace que el estudio de esas consecuencias y de los factores que llevaron al error que las produjo conlleva un impacto psicológico o emocional que sin duda puede contribuir a que el estudiante de ingeniería lo fije en su memoria. Sin embargo, los errores en ingeniería son poco empleados en la cátedra como recurso didáctico. Se prefiere en cambio enfatizar los logros y éxitos de la profesión. La razón de esta actitud se encuentra quizás en lo que Saturnino de la Torre [7] denomina “*pedagogía del éxito*” nos ha llevado a la creencia de que no es posible otra pedagogía diferente. Que la clave de una buena pedagogía estriba en asegurar el éxito del alumno evitando el error. Está claro que cuando se habla de una “*pedagogía del error*” no se está defendiendo su provocación. Por supuesto que el error no posee un valor educativo por sí mismo. Pero aceptándolo como hecho natural que acompaña al aprendizaje en lugar de condenarlo, de igual modo que la tensión y crisis están presentes en el desarrollo individual o en el progreso social, su análisis puede resultar enormemente enriquecedor. Siempre según de la Torre, el error es *un desajuste entre lo esperado y lo obtenido*. Hace referencia al criterio, norma o valor, pero no comporta actitud sancionadora ni punitiva. En otros tiempos se castigaba duramente al sujeto que no lograba los aprendizajes previstos, sin analizar sus causas.

La pedagogía del error parte del principio de que éste es un elemento inseparable de la vida. *No es posible no equivocarse en el proceso de aprender*. El error es asumido como una condición que acompaña a todo proceso de mejora, como un *elemento constructivo e innovador*. Y es que la formación humana no se guía por leyes o postulados científicos, por más que las Ciencias de la Educación traten de buscar reglas y normas con carácter generalizador. Es un esfuerzo encomiable siempre que se acepten sus limitaciones. Nunca será comparable el saber pedagógico con el conocimiento de las ciencias positivas. La mayor parte de nuestros aprendizajes se han adquirido por tanteo, por observación, por propia experiencia, comenzando

por nuestra primera lengua y terminando por la construcción científica. Filósofos como Bachelard entienden el desarrollo de la ciencia como una sucesión de errores corregidos. Equivocarse no sólo es una fatalidad humana, muchas veces puede ser lo que motiva el cambio. La consideración positiva del error supone una concepción innovadora para la mayor parte de los profesores.

Otra característica de esta nueva pedagogía del error sería según de la Torre, *la aceptación y análisis del error* frente a su negación que caracteriza a la pedagogía del éxito. Sustituye el criterio de *eficacia* por el de *eficiencia*. La eficacia viene definida en términos de relación objetivos/resultados. Un método eficaz es el que logra lo previsto, prescindiendo del costo. Una política de gobierno o de dirección de un centro se considera eficaz si logra sus objetivos. La eficacia constituye la espina dorsal de la pedagogía del éxito. La eficiencia se define en cambio en términos de *rentabilidad de recursos*, esto es de relación entre *objetivos, medios y resultados*. Entre los objetivos y los resultados introduce la utilización de medios y recursos. Cuando el estudiante logra aprender ciertos contenidos para el examen y los olvida una vez realizado este, ha conseguido el objetivo, pero su aprendizaje carece de solidez. Ha podido seguir un procedimiento eficaz, aunque no eficiente. En tanto que la pedagogía del éxito se implementa a través de una pedagogía por objetivos, la pedagogía del error parte de análisis, diagnósticos e intervenciones en el proceso. Tiene en cuenta el contexto en el que surgen los problemas. Frente a metas predeterminadas de forma inflexible, se da acogida a aprendizajes no previstos. En tal sentido se fijan objetivos, pero de forma abierta y flexible, de tal modo que puedan modificarse en base al análisis que se va realizando durante el proceso de aprendizaje.

Resumiendo, el error constituye sin duda un riesgo que acompañará siempre la exploración de terreno no totalmente conocido. Es una circunstancia inherente al progreso. Es responsabilidad de los involucrados sacar de esos errores las enseñanzas que compensen en el largo plazo el costo de los mismos. En qué medida estos conceptos pueden aplicarse al mejoramiento de la enseñanza de la ingeniería, es un interrogante que sin duda vale la pena explorar.

## Referencias bibliográficas

- [1] K. Robinson “*Out of our Minds: Learning to Creative*” Capstone Publishing Ltd., 2011.
- [2] C.F. Varotto” *Actividad espacial y políticas de estado*” Página 12, 11 de Marzo de 2014.
- [3] T.Boniszewski “*Manual metal arc welding: old process, new developments*” The Metallurgist and Materials Technologist, Octubre 1979.
- [4] D.G. Mayo “*Error and the Growth of Experimental Knowledge*” The University of Chicago Press, Chicago, 1996.
- [5] BBC Mundo “*10 Grandes errores de cálculo de la ciencia y la ingeniería*” BBC Mundo, @bbc\_ciencia
- [6] K.Easterling “*Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*” Butterworths, London, 1983.
- [7] S. de la Torre “*Aprender de los errores: El tratamiento didáctico de los errores como estrategias innovadoras*” Ed. Magisterio del Río de la Plata, Buenos Aires, 2004

## EL PAPEL DEL ERROR EN LA BÚSQUEDA DEL SABER

Horacio C. Reggini

e-mail: [horacioreggini@gmail.com](mailto:horacioreggini@gmail.com) - Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

*Errare humanum est. Séneca*

Hace cinco siglos, buscando el camino hacia la India a la zaga del sol poniente, Europa encontró y pobló América, sin vislumbrar siquiera en qué consistía la aventura ni los resultados que iba a generar. El acto de aprender suele acometerse de manera similar, a partir de una sutil combinación de ideas y sueños, razonamientos e intuiciones. El error –inseparable del quehacer intelectual– no sólo no puede evitarse sino que a menudo actúa positivamente. En “*Aventuras de las ideas*”, Alfred N. Whitehead [1] (1881–1947) dice: *La historia de las ideas es una historia de los errores, pero a través de todos los errores es también una historia de la gradual purificación de la conducta.*

### La ilusión de “hacerlo bien sin más vueltas”

Existen distintas teorías sobre la génesis de todo conocimiento. Algunos suponen que un aprendizaje excelente es el resultado de un misterioso y mágico despertar de la imaginación; otros sostienen que deviene de un esfuerzo continuado e intenso. Podría en general aceptarse que diversos saberes son fruto de prolongadas gestaciones. Es habitual que antes de llegar a dominar completamente un tema final, el que aprende corrija, deseche y agregue alternativas. Los autores de libros saben bien, por ejemplo, que la escritura es, en gran parte, re-escritura. Por otra parte, el arquitecto inglés Christopher Alexander [2] (1936), en “*Notas sobre la síntesis de las formas*”, afirmó con perspicacia que la única manera de alcanzar el ajuste adecuado entre un proyecto y sus requerimientos o propósitos es ir descubriendo sus deficiencias o fallas y, consecuentemente, eliminarlas. No existe ningún camino directo para deducir de modo automático formas o soluciones complejas a partir de requerimientos. Es decir que toda obra –incluso las maestras o excelsas– resulta de la depuración sucesiva de obras anteriores. Viene al caso el ejemplo de Mahatma Gandhi (1869-1948) que nunca se consideró un superhombre y no perdió oportunidad de hacer referencia a sus errores y fragilidades, al punto de que su autobiografía es, a la vez, un estricto itinerario de autocrítica.

### El error en el aprendizaje

En el campo de las teorías del aprendizaje, uno de los avances más significativos se produjo cuando comenzó a considerarse el aprendizaje como un proceso de construcción llevado a cabo por el propio aprendiz. Hasta entonces, el alumno era concebido como un receptor pasivo, como si se tratara de una tabula rasa sobre la cual el maestro podía imprimir conocimientos desde afuera. Se suponía que el objeto de conocimiento era directamente internalizado por el alumno, sin tener en cuenta la heterogeneidad de lo que aprendía ni el contexto de la experiencia. Fueron las investigaciones llevadas a cabo por el sabio suizo Jean Piaget (1896-1980) las que demostraron que todos los alumnos, antes de recibir una

determinada educación, desarrollan “teorías ingenuas” que les sirven para vivir y explicarse el mundo que los rodea. La figura de Piaget, ligada a las teorías constructivistas, influyó sin duda en diferentes corrientes de pensadores que empezaron a considerar el aprendizaje como un proceso de adquisición y práctica de nuevas metodologías, habilidades y aptitudes necesarias para enfrentar situaciones no previstas.

El proceso constructivo “depuración” explicado formalmente por Piaget [3] hace más de medio siglo al establecer las bases de su epistemología genética, fue puesto en valiosa práctica, entre otros, por su discípulo Seymour Papert (1928), un distinguido investigador en el campo de la educación y las computadoras, al crear el lenguaje LOGO [4] en el M.I.T., alrededor de 1980. La corrección de errores en los programas (el “debugging” en la jerga de la computación) –o sea la exigencia de ir corrigiendo a medida que se prueban los programas– es una de las razones principales del uso de las computadoras en las aulas. Papert [5] ha defendido la importancia del error en la construcción del conocimiento cuando los resultados de las acciones se acompañan de la reflexión. Valoriza, el papel del error, al que no considera como una imperfección que deba ser eliminada. sino como un elemento funcional que participa en el proceso de alcanzar un objetivo y en el “*darse cuenta*”: “*los errores nos benefician, porque nos llevan a estudiar lo sucedido, a comprender lo que anduvo mal y, a través de la comprensión, a corregirlo*”.

Dentro de su vasta producción, el filósofo austriaco Karl R. Popper [6] (1992–1994) también se ocupó del problema del crecimiento del conocer. Aunque nunca trató específicamente el tema de la educación, sus ideas refutaron la concepción tradicional del conocimiento definitivo. Popper estableció la hipótesis de que la internalización y el acrecentamiento del conocimiento se producen por medio de “conjeturas y refutaciones”, y de que sólo es posible aprender a través del método de ensayo y error. En tal sentido, escribe [7]: “Pero a mí me parece que lo esencial al pensamiento ‘creativo’ o ‘inventivo’ es la combinación de un intenso interés en algún problema (y por lo tanto la disposición a ensayar una y otra vez) con una fuerte facultad crítica; con una disposición para atacar aun aquellas presuposiciones que para un pensamiento menos crítico determinan los límites de la escala a partir de la cual son seleccionadas las pruebas (conjeturas); con una libertad de imaginación que nos permite avizorar fuentes insospechadas de error: posibles prejuicios que necesitan examen crítico”.

Para Popper [8] “el proceso de aprender consiste principalmente en correcciones a expectativas que no se cumplen” y que son, justamente, las mismas que desencadenan el proceso de ensayo y error. Popper también decía: “vivir es solucionar problemas [...] En la naturaleza sin vida no hay problemas [...] Los problemas surgen a raíz de la vida, pertenecen a la relación entre los seres vivos y el mundo”. Problema entendido como la frustración de una expectativa, lo que obliga a ensayar varias soluciones posibles que se eliminan por el esquema de ensayo-error. El aprendizaje es un proceso de evolución, elaboración y maduración de experiencias anteriores [9]. Cervantes escribió que para su Quijote el camino era preferible a la posada. De la misma manera, lo más importante en los viajes hacia cualquier saber son las diversas etapas que cada uno transita hasta obtenerlo. El error a menudo es inevitable y, a la vez, fecundo. Perseguirlo y estigmatizarlo en las aulas condena a ignorar cómo se ha llegado a las grandes ideas y los descubrimientos.

## **El temor a equivocarse**

Es digno de destacar que el pensamiento de Domingo Faustino Sarmiento [10] (1811-1888) ya sustentaba ideas similares a la concepción de que un plan hipotético y teórico debe ser permanentemente contrastado con el resultado de la práctica a fin de enmendar posibles errores. Es al dinamismo de Sarmiento que se atribuye la frase: “*hacer las cosas mal, pero hacerlas*”. Sarmiento [11] insistía en la necesidad de comenzar a hacer las cosas, pero ello

no significaba que, si salían mal, no deberían ser corregidas a posteriori: "... *creo poseer un secreto de hacer las obras, y es ponerse a hacerlas desde que se concibe la idea de su necesidad y su ventaja. Haciéndolas es como se palpan sus dificultades y se encuentran los medios para realizarlas*". La misma idea ilumina un artículo que escribió en 1859 para el diario *El Nacional* [12], en el que era redactor: "... *haciendo mal las cosas pero de rápidos resultados para hacerlas mejor cuando no esté uno de prisa. Primero que anden los wagones, y después se verá como se puede mejorar lo hecho ... Hacer, antes de todo*".

El espíritu pragmático de Sarmiento no se demoraba en la elaboración de teorías. Si consideraba que algo debía hacerse, lo hacía de inmediato, sin vacilar. Con entusiasmo desbordante y poderoso ascendente apremiaba para que las cosas se hicieran, tal vez imperfectas al principio, pero que se hicieran. Prefirió la posibilidad del error y el fracaso antes que la inactividad. No es que Sarmiento no tuviera en consideración las faltas que se podían cometer, sino que le temía más a otro error: el de no hacer. Siguiendo su línea de pensamiento, es posible inferir que los que no cometen errores están expuestos a incurrir en el mayor de todos al no intentar nada nuevo.

A aquellos que oponían trabas a sus proyectos, Sarmiento [13] les respondía con vehemencia y, a veces, con ironía. En 1853, comentarle una ley de correos sancionada en los Estados Unidos, expresaba: "hágase una ley mala, pésima, pero póngase mano a la obra". Exageraba un poco para ser mejor comprendido y gritaba como el arriero a su tropa: "Hay que hacer las cosas, aunque al principio no se comience muy bien (en el camino se componen las cargas); es menester salir de viaje temprano, al alba grande aunque luego nos detengamos hasta que aclare [...] Todo está en principiar, y andando a favor del viento éste ayudará; por eso no conviene estarse quedo, cruzado de brazos; hay que moverse y andar, y está dicho en el mismo Evangelio: 'buscad y hallaréis', 'golpead y se os abrirá'". Sin duda, es indispensable aprender con el mismo espíritu de iniciativa, búsqueda constante y acción denodada que caracterizó a Sarmiento. Sin duda tan importante como fijarse una meta, es reconocer la importancia del recorrido hacia ella.

Las consideraciones anteriores podrían ser rematadas con otras de tenor más lejano y profundo. José Ortega y Gasset [14] (1883-1955) escribió: "*La auténtica plenitud vital no consiste en la satisfacción, en el logro, en la arribada*". Por otro lado, Gotthold Ephraim Lessing [15] (1729-1781) afirmó: "*La búsqueda de la verdad es más preciosa que su posesión*", máxima que, antes, Homero (c. siglo VIII aC.) había expresado así: "*El viaje al paraíso ya es el paraíso. El viaje es lo que cuenta*". Reflexión esta última que en *Ensayos* trasladó Michel Eyquem de Montaigne (1533-1592) a otros aspectos humanos con la famosa frase: "*No importa el ser, sino la travesía*". Robert L. Stevenson [15] (1850-1894) a su vez, dijo: "*Viajar con esperanza es mejor que llegar*". A su vez, José Ingenieros (1877-1925) escribió: "*Nunca se llega. Llegar es morir*". Y santo Tomás de Aquino<sup>17</sup> (1225-1274): "*Gratitud a los que yerran*", resultante de un comentario de un texto muy anterior de Aristóteles [16] (384 aC.-322 aC.)

## Referencias bibliográficas

- [1] Whitehead, Alfred North, *Adventures of Ideas*, p. 25 (The history of ideas is a history of mistakes. But through all mistakes it is also the history of the gradual purification of conduct), The MacMillan Co., New York, 1969. *Aventuras de las ideas*, p. 36, Co. Gral. Fabril Editora, Buenos Aires, 1961.
- [2] Alexander, Christopher, *Notes on the Synthesis of Forms*, Harvard University, Cambridge, Mass., 1964.
- [3] Piaget, Jean, *El nacimiento de la inteligencia en el niño*, Ed. Ábaco, Buenos Aires, 1977.
- [4] Reggini, Horacio C., *Alas para la mente. LOGO: Un lenguaje de computadoras y un estilo de pensar*, Ed. Galápagó, Buenos Aires, 1982.
- [5] Papert, Seymour, *Desafío a la mente*, Ed. Galápagó, Buenos Aires, 1981, p. 135.
- [6] Reggini, Horacio C., "Popper y Papert", en *Computadoras ¿Creatividad o Automatismo?*, Ed.

- Galápagó, Buenos Aires, 1988. Artículo previamente publicado en la Revista del Instituto de Investigaciones Educativas, IIE, Buenos Aires, año 14, Nº 63, agosto 1988.
- [7] Popper, Karl R., *Unended Quest*, p. 48 (But it seems to me that what is essential to 'creative' or 'inventive' thinking is a combination of intense interest in some problem (and thus a readiness to try again and again) with highly critical thinking; with a readiness to attack even those presuppositions which for less critical thought determine the limits of the range from which trials (conjectures) are selected; with an imaginative freedom that allows us to see so far unsuspected sources of error: possible prejudices in need of critical examination), Flamingo, 1986. *Búsqueda sin término*, p. 64, Ed. Tecnos, Madrid, 1985.
- [8] Popper, Karl R., *Sociedad abierta, universo abierto. Conversación con Franz Kreuzer*, Ed. Tecnos, Madrid, 1984, p. 99. Paidós, Barcelona, 1981, p. 440.
- [9] Berkson, W. & Wettersten, J., *Learning From Error; Karl Popper's Psychology Of Learning*, Open Court Publishing Co., Illinois, EE.UU, 1984, p. 8.
- [10] Reggini, Horacio C., *Sarmiento y las telecomunicaciones. La obsesión del hilo*, Cap. II: "El hacedor incansable", Ed. Galápagó, Buenos Aires, 1997.
- [11] Galván Moreno, C., *Pensamientos de Sarmiento*, Revista de Correos y Telégrafos, año II, Nº 13, septiembre de 1938, pp. 147/9.
- [12] *El Nacional*, 11 de julio de 1859, en *Obras Completas*, Sarmiento D. F., Tomo XXVI, p. 196. El discurso completo se halla en el Tomo XVIII, p.290.
- [13] Sarmiento, D. F., *La posta barata* en *Obras Completas*, Tomo VIII. Reproducido de la Revista de Correos y Telégrafos, año II, Nº 13, septiembre de 1938, p. 94.
- [14] Ortega y Gasset, José, *La rebelión de las masas*, Edit. Andrés Bello, Barcelona, 1996, p. 72.
- [15] Kovadloff, Santiago, *Ensayos de intimidad*, Emecé, Buenos Aires, 2002, pp. 17/19. S. Kovadloff interpreta las palabras de Stevenson en la forma siguiente: "Es obvio para muchos de nosotros, que esa frase ciertamente espléndida por lo conmovedora, no ha querido sacrificar la coherencia de su sentido en el altar de la hermosura. Es a todas luces, la frase de un hombre que ha viajado mucho. De un veterano de incontables partidas y arribos, como bien lo prueba su biografía. De un aventurero que ha vuelto de innumerables sitios y largas travesías, emprendidas y sostenidas en su transcurso con el fervor de la expectativa franca, el deseo de llegar adonde se lo había propuesto. De un hombre que, tras haber desembarcado en cada uno de sus destinos anhelados, terminó descubriendo, a fuerza de sentirse desconsolado por la pobreza de sus hallazgos, o su valor relativo, que el mejor puerto de llegada es aquel que alcanzan los sueños cimentados al partir".
- [16] Aristóteles en *Methaph.* II, Lect. 1, s. 99, muestra en pág. 287: "[...] cómo los hombres se ayudan unos a otros en la consecución de la verdad. En efecto, alguien es ayudado por otro en la búsqueda de la verdad de dos maneras. De un modo directo y de un modo indirecto. Los que encontraron la verdad le ayudan de modo directo, porque, como se ha dicho, mientras cada uno de los antecesores encontraba algo de la verdad, la integraba en una unidad e introducía a los que venían después en el magno conocimiento de la verdad. Indirectamente, en cuanto que los primeros, aun errando sobre la verdad, dieron a los siguientes la ocasión de ejercitarse para que, después de una cuidadosa discusión, apareciese más límpidamente la verdad"; y en pág. 288: "Por otra parte, es justo que estemos agradecidos a aquellos que, en un bien tan grande como es el conocimiento de la verdad, nos han proporcionado ayuda. Y, por tanto, dice que es "justo dar gracias" no sólo a quienes se estima que han encontrado la verdad y cuyas opiniones se comparten, siguiéndolas, sino también a quienes, no habiendo acertado en su búsqueda de la verdad y cuyas opiniones nos resulta imposible seguir; porque éstos también nos han dado algo: la ocasión de ejercitarnos en la cuestión de buscar la verdad".

## **¿QUÉ ES LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL?**

*Alberto Bernardini<sup>1</sup>, Arturo J. Bignoli<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Colaborador senior en el “Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale” (ICEA) dell’Università degli Studi di Padova (Italia); Miembro correspondiente de la Academia Nacional de Ingeniería (Argentina) (A.N.I.)

<sup>2</sup>e-mail: arturobignoli@fibertel.com.ar - Presidente Honorario de la Academia Nacional de Ingeniería (A.N.I.); Miembro Titular de las Academias Nacionales de Ingeniería y de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (A.N.C.E.F.N.). Profesor Honorario de las Universidades Nacionales de Buenos Aires (U.B.A.) y de Córdoba (U.N.C.). Profesor Emérito de la Pontificia Universidad Católica Argentina (U.C.A.). Doctor Honoris Causa de la Universidad Nacional de Tucumán (U.N.T.). Academico Correspondiente de las Academias Nacionales de Ciencias en Córdoba (A.N.C.C.) y de la Academia Nacional de Ingeniería del Uruguay.

### **Resumen**

El objetivo de la Ingeniería Estructural es diseñar y construir con una “propensión a la falla” que debe ser calificada para considerar la construcción como “segura”. Dos variables de incertidumbre “Demanda” D y “Capacidad de respuesta” CR son introducidas en el proceso de calificación para obtener límites superiores e inferiores de esa tendencia (a fallar o a no hacerlo). En este trabajo, los sucesivos pasos son: Comenzando con coeficientes determinísticos de seguridad de las probabilidades Booleanas, encontrar sus límites y generalizarlas a probabilidades no Booleanas. Finalmente, los límites superiores e inferiores de “propensión a la falla” son obtenidos en dos formas diferentes mostrando su coherencia. Conclusiones generales y comentarios útiles para profesionales y docentes se dan al final del trabajo.

### **Abstract**

The objective of Structural Engineering is designing and building constructions with a “proneness to failure” that must be qualified to consider the construction as “safe”. Two uncertain variables “Demand” D and “Capacity of Response” CR are introduced in the process of qualification to obtain upper and lower limits of “proneness” (To failure or not).

In this paper the successive steps are: Beginning with deterministic coefficients of safety to Boolean probabilities, finding its limits and generalizing to not Boolean probabilities.

At last the upper and lower limits of “proneness” are obtained by two different ways showing their coherence. General conclusions and comments usefull for professionals and professors are given at the end.

### **INTRODUCCIÓN**

La Ingeniería Estructural es una de las ramas de la Ingeniería cuyo objeto es el proyecto y la construcción (invención o creación) de las estructuras (conjuntos ordenados de elementos que interactúan entre sí, con el fin de cumplir o garantizar un objetivo) relacionado con la construcción de estructuras civiles y militares o en general con artefactos.

El cumplimiento de los objetivos requiere la predicción de eventos o procesos que pueden ocurrir en el futuro, es decir, en el período de tiempo en el que se utilizará la estructura. No puede, por tanto, en ningún caso garantizar con certeza el logro de tal objetivo.

La aceptabilidad (o inaceptabilidad) de una estructura, que existe realmente o virtualmente definida por el proyecto, requiere:

- Que el proyectista sea capaz de calificar de alguna manera la “propensión a no fallar” (o, respectivamente, la “propensión a fallar”), en el cumplimiento de los objetivos prefijados y
- Que la sociedad en su conjunto, por consenso otorgue el consentimiento informado y con conocimiento, democráticamente expresado por los ciudadanos o por consenso de expertos delegados del poder político, que sean capaces de expresar el mínimo (o máximo, respectivamente) de estas propensiones.

En este trabajo se propone discutir las formas en que estas calificaciones de la “propensión” se puedan expresar tomando en cuenta la incertidumbre que no puede ser eliminada por el ingeniero, en su actuación profesional.

Esto da lugar a muchos problemas y cuestiones éticas, por ejemplo:

- La formación de los ingenieros. Tanto científica como empírica o profesional.
- La obtención de la matrícula profesional. De acuerdo a la aptitud adquirida.
- El papel de los llamados “normas o reglamentos” más o menos complejos, con cuyo cumplimiento se trata de resolver el problema y llegar a la aceptabilidad o inaceptabilidad del proyecto, y calificar la responsabilidad civil y penal del proyectista y del constructor.
- Y por último, la forma, en una sociedad real, a menudo lejos del esquema ideal descrito en el párrafo anterior, de obtener el consenso sobre el riesgo aceptable, de manera efectiva y provisoria y luego, a veces bruscamente, se pierde tal consenso, sobre todo en el caso de eventos catastróficos revelando de repente que la ciudadanía ha aceptado el riesgo sin suficiente sustento.

## **DEL DETERMINISMO AL MODELO PROBABILÍSTICO ( BOOLEANO )**

El problema de la incertidumbre en la verificación de la seguridad de las obras de ingeniería ha aumentado gradualmente desde el siglo XVIII, cuando se comenzó a tener medidas numéricas del peso y la resistencia de los materiales, así como de los procedimientos analíticos y gráficos para el cálculo de las solicitaciones que se originan en las construcciones, los estados de tensión causados por los pesos y las acciones exteriores.

Entonces se pensó que el problema podría ser resuelto con un *coeficiente de seguridad global*, imaginando que el ingeniero experto, teniendo en cuenta, de una manera más o menos consciente, las consecuencias sociales y económicas, las penas por incapacidad personal, establecidas de forma expresa por el poder político o de cualquier manera relacionadas con la pérdida de credibilidad o prestigio profesional.

Los valores numéricos de tales coeficientes podrían variar de 2 hasta 10, en particular respecto de los fenómenos repentinos o insidiosos, tales como los relacionados con la pérdida de estabilidad del equilibrio elástico.

Desde principios del siglo XX, los valores de estos coeficientes de seguridad comenzaron a ser codificados en normas legales (reglamentos), al parecer esperadas y sugeridas por los mismos ingenieros como una herramienta para reducir el riesgo personal: el cumplimiento de la normativa era suficiente para eliminar la responsabilidad con respecto a las fallas consideradas como *imprevisibles*.

A partir de mediados del siglo XX esta situación comenzó a aparecer insatisfactoria o irracional. La consolidación simultánea de herramientas matemáticas tales como la Estadística y la Teoría de probabilidades, junto con algoritmos numéricos gracias al aumento exponencial

de potencia de los ordenadores electrónicos, han sugerido la posibilidad de basar las decisiones mediante la comparación con la probabilidad de que los costos y beneficios sean similares a los emleados en el campo de la Economía.

Por ello, se hizo la hipótesis que el ingeniero (y la sociedad a la que pertenece) no podían pretender excluir una falla determinística de la estructura planificada , sino simplemente:

- Calificar la propensión a fallar  $\mathbf{F}$  y a no fallar  $\neg\mathbf{F}$ , con números proporcionales a sus probabilidades (en lo que sigue asumimos que las propensiones se definen en el rango entre 0 a 10) en un espacio multidimensional definido por la probabilidad de las variables aleatorias que describen resistencias y acciones que rigen el comportamiento de la estructura durante su vida útil.
- Comparar estas propensiones con valores aceptables para la sociedad, eventualmente codificados en un reglamento.

Se tiene por lo tanto, ya que los eventos  $\mathbf{F}$  y  $\neg\mathbf{F}$  son complementarios :

$$P(\mathbf{F}) = 10 \cdot P(\neg\mathbf{F}) < P(\mathbf{F})_{adm} = 10 \cdot P(\neg\mathbf{F})_{adm} \quad (1)$$

donde  $P(\mathbf{F})$  es la propensión a la falla y  $P(\neg\mathbf{F})$  la propensión a la no-falla.

Supongamos por ejemplo, que la falla se puede determinar simplemente mediante la comparación de los valores de dos variables aleatorias estocásticamente independientes que califican la capacidad de respuesta de la estructura  $CR$  y la demanda  $D$ , cuando la estructura se somete durante el período de vida (uso) a esta última. Las variables se definen en espacios superponibles numéricos, por ejemplo el espacio de los números reales no negativos que miden respectivamente:  $d$  - fuerzas - y  $r$  - resistencias -, por ejemplo, en kN, son funciones de la densidad de probabilidad  $p_{CR}(r)$  y  $p_D(d)$  de las dos variables aleatorias, y luego también la función de probabilidad acumulada  $F_{CR}(r)$ , que mide la probabilidad de que la resistencia sea más baja para cada valor de  $r$  conocido. Por lo tanto, para  $r$  = resistencia y  $s$  = sollicitación, es:

$$P(\mathbf{F}) = 10 \cdot \int_{\Omega^-(r,s):r \leq s} p_{CR}(r) \cdot p_D(s) dr ds = 10 \cdot \int_0^\infty F_{CR}(r = s) \cdot p_D(s) ds \quad (2)$$

En las Figs.1a y 1b las dos relaciones se representan graficamente en el caso particular en el que las densidades de probabilidad sean uniformes sobre los intervalos  $[a,b]$  y  $[c,d]$  que definen los rangos de resistencia y de sollicitación respectivamente y que son nulas fuera de

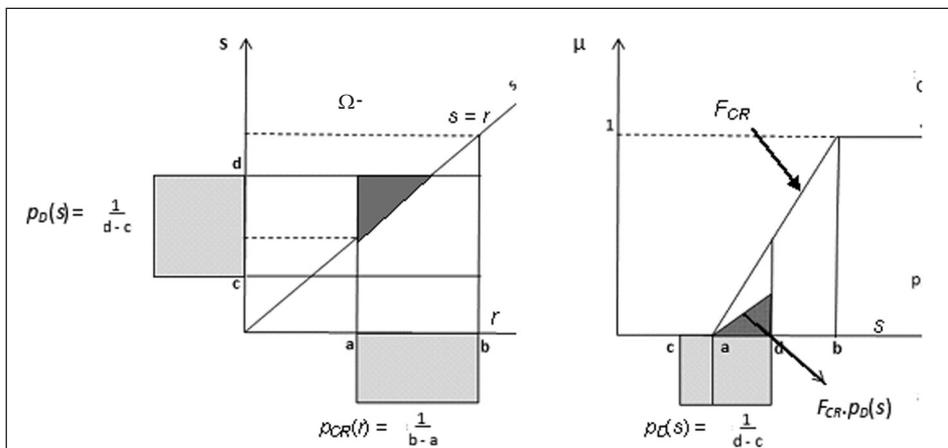


Figura 1 A

Figura 1 B

ellos, y que en particular sea  $c < a$  y  $d < b$ . En la Fig. 1b,  $\mu$  es la función de pertenencia que define al conjunto de valores  $F_{CR}$ . Se obtiene de (2)<sup>1</sup>:

$$P(\mathbf{F}) = 10 \cdot \int_{\Omega} \frac{1}{b-a} \cdot \frac{1}{d-c} dr ds = 10 \cdot \int_a^d \frac{s-a}{b-a} \cdot \frac{1}{d-c} ds = \frac{10}{2} \frac{(d-a)^2}{(b-a)(d-c)}$$

## LOS LÍMITES DEL MODELO PROBABILÍSTICO Y SU GENERALIZACIÓN EN EL ÁMBITO DE UNA LÓGICA NO BOOLEANA

En realidad, los intentos de aplicar rigurosamente el modelo probabilístico se enfrentaron con dificultades teóricas (por ejemplo, en la definición de la probabilidad aceptable de fracaso del análisis de la relación “costo/beneficio” requeriría una evaluación económica de la pérdida de la vida humana, la imposibilidad de una evaluación de la probabilidad del error humano) y práctica (falta de información fiable sobre las variables aleatorias de interés). Por tanto, se recurrió a métodos aproximados o semi-probabilísticos, con base en factores parciales de seguridad relativos a las cargas y resistencias, sólo débilmente relacionados con valores asumidos de una pequeña probabilidad de falla que puede elegirse (por ejemplo, entre  $10^{-6}$  y  $10^{-3}$ , pero que de hecho, casi nunca se mencionan explícitamente en los reglamentos).

Además, en numerosas investigaciones, sobre todo a partir de la segunda mitad del siglo pasado, se ha analizado la forma en que el cerebro humano parece operar con la información disponible para tomar decisiones, así como las investigaciones orientadas a la creación de inteligencia artificial para el control automático de los sistemas complejos, parecen sugerir enfoques menos rígidos que el booleano .

En particular, la mente humana no divide necesariamente las proposiciones en verdaderas o falsas. También toma en cuenta proposiciones que considera parcialmente verdaderas o parcialmente falsas. Teniendo en cuenta propuestas alternativas o complementarias no se aplica necesariamente el principio del “tercero excluido”.

Por lo tanto para abordar el problema, planteado en la introducción de la aceptabilidad (o de la inaceptabilidad) de una estructura parece apropiado verificar por separado las siguientes proposiciones.

En adelante indicamos con  $P(A)$  no a la probabilidad de la ocurrencia de un evento  $A$ , medida adecuada, ordenada y escalar, sino a la “propensión” a la ocurrencia de un evento  $A$  con  $P(A)$  y con  $P(\neg A)$  la “propensión” a la no ocurrencia del mismo evento  $A$ .

La aceptabilidad parece requerir el cumplimiento de las dos siguientes condiciones para el evento  $\mathbf{F}$  ( $\mathbf{F}$  = “Falla” ):

$$P(\neg \mathbf{F}) > P(\neg \mathbf{F})_{\text{adm,min}} \quad (3)$$

$$P(\mathbf{F}) < P(\mathbf{F})_{\text{adm,max}} \quad (4)$$

La no-aceptabilidad se realiza de manera similar al verificarse por lo menos una de las dos condiciones siguientes :

$$P(\neg \mathbf{F}) < P(\neg \mathbf{F})_{\text{adm,min}} \quad (5)$$

$$P(\mathbf{F}) > P(\mathbf{F})_{\text{adm,max}} \quad (6)$$

Supongamos, por ejemplo, de forma análoga a lo que se discutió anteriormente, que la “propensión a fallar” puede simplemente ser determinada por la comparación de la capacidad

<sup>1</sup>En el caso  $b < d$  la (2) establece, por ejemplo, usando la segunda de las dos relaciones:

$$P(\mathbf{F}) = 10 \cdot \int_a^b \frac{s-a}{b-a} \cdot \frac{1}{d-c} ds + 10 \cdot \int_b^d 1 \cdot \frac{1}{d-c} ds = \frac{10}{2} \frac{(b-a)^2}{(b-a)(d-c)} + 10 \frac{d-b}{d-c}$$

y el primer término se anula por  $b$  que tiende a  $a$ .

de respuesta CR de la estructura y la demanda D cuando la estructura se somete a un conjunto de circunstancias interactivas (acciones externas e internas) que pueden ocurrir durante el período de vida (uso) de la estructura.

Supongamos, además, que la capacidad de respuesta CR de la estructura, por consenso de los expertos y la demanda D, se califican por dos subconjuntos borrosos del espacio de los números naturales o los reales positivos, respectivamente, CR y D.

La función de pertenencia  $\mu_{CR}(r)$  de CR califica el grado de convicción de los expertos que la resistencia de la estructura puede ser mayor que  $r$ , y es por lo tanto, en general, una función decreciente (no en sentido estricto) con  $r$ ; asumirá el valor máximo (igual a 1) para  $r = 0$  o más generalmente hasta un valor en  $({}^1I_{CR} = [0, a], \alpha\text{-cut con } \alpha = 1)^2$ , anulándose eventualmente por encima de un segundo rango que incluye el anterior ( ${}^0I_{CR} = [0, b], \alpha\text{-cut con } \alpha = 0$ ). La función de pertenencia  $\mu_D(s)$  de D, mide el grado de convicción de los expertos que en los valores de  $s$  se puede asumir que la acción aplicada: por lo general será máxima (igual a 1) para un determinado valor, o más en general, para un rango finito de valores ( ${}^1I_D = [c_1, d_1], \alpha\text{-cut con } \alpha = 1$ ), disminuyendo en el exterior, a partir de los dos límites superior e inferior de ese rango y, posiblemente, nada fuera de un rango que incluye los anteriores ( ${}^0I_D = [c_0, d_0], \alpha\text{-cut con } \alpha = 0$ ).

Los expertos podrían entonces ponerse de acuerdo sobre las siguientes calificaciones de la “propensión a no fallar” y “propensión a fallar”:

$$P(\neg\mathbf{F}) = \frac{|D \cap CR|}{|D|} \cdot 10 \quad (7)$$

$$P(\mathbf{F}) = \frac{|D \cap CR^c|}{|D|} \cdot 10 \quad (8)$$

donde el símbolo  $|\dots|$  indica cardinalidad,  $\cap$  intersección y el ápice C complemento. Obsérvese que también en este caso se normalizan las calificaciones de tal manera que la propensión P varía desde un mínimo de 0 (cuando la intersección está vacía) a 10 (cuando la intersección en el numerador de (7) u (8) coincide con D)

Por ejemplo, supongamos que las operaciones de unión, intersección y complemento entre conjuntos borrosos se basan en el acuerdo de los expertos con los operadores definidos inicialmente por (Zadeh, 1965): a saber, los *operadores máximo(max)*, *mínimo(min)* y *complemento* a 1 de los valores en cada punto de sus funciones de pertenencia.

Consideremos el ejemplo que se muestra esquemáticamente en la figura 2a, con las funciones de pertenencia modeladas por la línea quebrada,  $a < d_0 < b, d_1 < a$ . Es obvio que en este caso se obtiene:

$$\begin{aligned} P(\neg\mathbf{F}) &= 10 \\ P(\mathbf{F}) &> 0 \end{aligned}$$

Por lo tanto, de acuerdo con el valor acordado para  $P(\mathbf{F})_{\text{adm,máx}}$  la relación (6) puede ser satisfecha, y por lo tanto el proyecto no es aceptable. Se puede observar en la figura que la intersección de D con el complemento de CR (que aparece en el numerador de (8)) no está vacío, sino incluido en la intersección de CR con su complemento; intersección que muestra claramente una violación del principio de “tercero excluido”.

En la Figura 2a la superficie del área grisada oscura mide la cardinalidad de la intersección de **D** con el complemento de **CR**. En la figura 2b, **c** es la función característica de los conjuntos clásicos.

<sup>2</sup>Recordemos que dado un conjunto borroso  $\tilde{A}$  del referencial E, se llama  $\alpha$ -corte o  $\alpha$ -cut al subconjunto nítido  $A_\alpha$  de E, definido como  $A_\alpha = \{x \in E / \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}$  para todo  $\alpha \geq [0,1]$

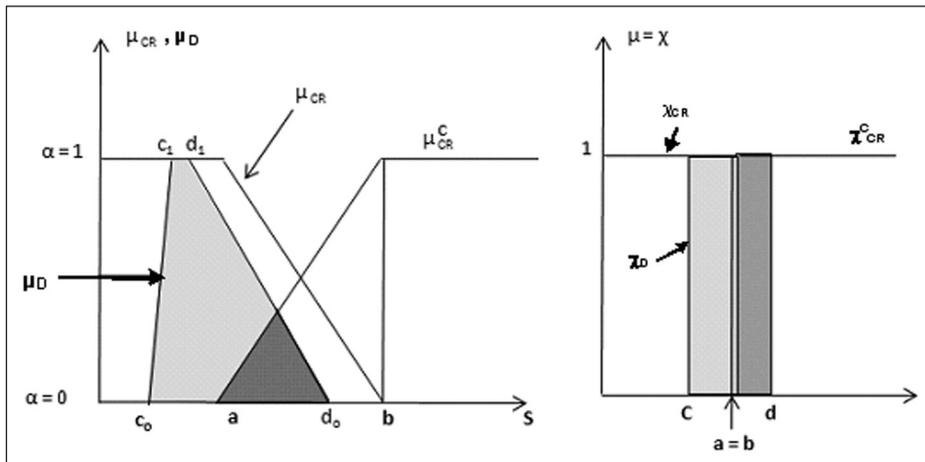


Figura 2 A

Figura 2 B

Véase que las ecuaciones (7) y (8) pueden también ser aplicadas en el caso en el que los conjuntos borrosos degeneran en conjuntos ordinarios, a saber: con  $a = b$ ,  $c_0 = c_1$  y  $d_0 = d_1$  en los intervalos  $I_{CR} = [0, a] = {}^1I_{CR} = [0, a] = {}^0I_{CR} = [0, b]$  y respectivamente  $I_D = [c, d] = {}^1I_D = {}^0I_D$ .

En este caso, la resistencia es determinística y la incertidumbre en relación con la carga se describe mediante un conjunto clásico booleano de valores posibles (no necesariamente equiprobables) el principio del tercero excluido vuelve a cumplirse. Se obtiene entonces [3]:

$$P(\mathbf{F}) = 10 \frac{d - a}{d - c} = 10 - 10 \frac{a - c}{d - c}$$

Es fácil observar también que si los valores en  $[c, d]$  se consideran equiprobables, y la propensión a fallar y a no fallar se calculan con (2), asumen los mismos valores calculados a partir de las relaciones (7) y (8). Esta es una prueba de la congruencia de las dos definiciones, aparentemente muy diferentes de propensión implícita en la (2) y con en las relaciones (7) y (8).

Puede establecerse una congruencia sustancial de las dos definiciones aparentemente muy diferentes de propensión implícita en las (1) y (2) con las relaciones (7) y (8).

La congruencia se extiende también al caso en que la resistencia no sea determinista, cuando se toma  $\mu_{CR}(r) = 1 - F_{CR}(r)$  y la intersección del numerador de (7) y (8) se realiza a través del operador *producto*, consistente con la hipótesis de independencia estocástica, como alternativa al operador *mínimo* utilizado en el ejemplo anterior<sup>3</sup>.

## CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

La incertidumbre está presente en todas las actividades de la Ingeniería Estructural. Por ello se trató de salvar los errores y fallas que origina adoptando un “coeficiente de seguridad” aumentando las acciones externas e internas que las solicitan.

En los siglos XIX y XX se siguió el camino que se expuso en este trabajo llegándose a la siguiente conclusión, basada en trabajos de L.Zadeh (1965), A.Pugsley (1966) y posteriores de D, Blockley y otros, entre ellos los autores de este trabajo: que sólo puede tratarse de lograr

<sup>3</sup>Para intersecciones de conjuntos clásicos (booleanos) el operador *producto* y el *mínimo*, aplicado a sus funciones características  $\chi$ , proporcionan los mismos resultados. El resultado es bastante diferente en el caso de la intersección de conjuntos borrosos, en el que los operadores se aplican a sus funciones de pertenencia.

que la “Propensión a fallar” (o a no fallar) se mantengan entre límites obtenidos aplicando Lógicas Alternativas no Booleanas. Ver expresiones (3) (4) (5) y (6), así como sus aplicaciones prácticas si se emplean Conjuntos Borrosos (Fuzzy Sets). La calificación debe ser hecha por ingenieros estructurales experimentados (Expertos).

### **Referencias bibliográficas**

- [1] Bernardini, A., Tonon, F. (2010). *Bounding uncertainty in Civil Engineering: theoretical background*. SpringerVerlag, Berlin Heidelberg.
- [2] Bignoli, A., (1992). *La Seguridad de las Construcciones*. (Editor U. Austral).
- [3] Bignoli, A., Fazio, J.,(1992). *Assessment of Proneness to Structural Failure and Risk with Fuzzy Sets*.IVth. International Conference on Structural Failure. ( Vienna, Austria.)
- [4] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control* 8, 338-353
- [5] Pugsley, A. (1966). *The Safety of Structures*. Edward Arnold Publishers.
- [6] Blockley, D., Godfrey, P. (2000) *Doing it differently*. Ed. Thomas Telford.
- [7] Blockley, D..(1992). *Engineering Safety*. Mc. Graw Hill.



## **LA MATEMATICA EN LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA CIVIL**

*Eduardo Núñez*

e-mail: enunezgeo@yahoo.com.ar – Miembro Titular de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

### **Resumen**

El ingeniero usa los conocimientos adquiridos por la experiencia para el desarrollo del arte del hacer cosas para mejorar las condiciones del hombre en la Sociedad. La empíria es importante, pero no basta. El método científico amplía las posibilidades de invención e innovación. El estudio de las matemáticas es imprescindible y potencia el mejor uso de los instrumentos modernos de cálculo.

### **Abstract**

The engineers use the knowledge obtained by the experience to apply it in the art of making things to improve the conditions of the human society. The empirical knowledge is important, but not sufficient; the scientific method application enhances the invention and innovation possibilities. The study of mathematic is mandatory because allows the use of modern calculation instruments for analysis.

## **LA INGENIERIA**

En la ingeniería se aplican los conocimientos científicos del mundo físico que los transforman en materializaciones tecnológicas, desarrollando técnicas que permitan la ejecución de procedimientos de fabricación, produzcan obras nuevas fabricadas por el hombre, posibiliten el desarrollo de artefactos y maquinarias y concreten metodologías para la ejecución de los inventos de los ingenieros y optimicen el aprovechamiento de los recursos de la naturaleza para el mejor bienestar humano.

La actividad de los ingenieros trasciende la sola experiencia alcanzada a lo largo de la historia del desarrollo de las realizaciones concretas, y emplea sistemáticamente el espíritu de observación e innovación para ampliar permanentemente el campo operativo y la formulación de modelos matemáticos, recurriendo en forma sostenida a los métodos científicos y a las pruebas de validación que permitan obtener resultados específicos y materializaciones tangibles. La ingeniería es una actividad profundamente reflexiva, práctica, que requiere habilidades de abstracción, y contemporáneamente abierta a la más amplia imaginación creadora. Los ingenieros proyectan, inventan y ejecutan en el ámbito propio del progreso social y de la solidaridad humana.

## **LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERIA**

Las actividades en las Escuelas de Ingeniería cubren amplios aspectos conectados con las construcciones civiles y mecánicas, las comunicaciones, los problemas hidráulicos, los recursos naturales de la tierra y del mar, el uso del espacio aéreo y extraterrestre, la organización del territorio, de las actividades industriales y administrativas y la optimización de la producción, del desarrollo de las ingenierías biomédicas, de las aplicaciones de la electricidad, electrónica, sistemas computacionales, nanotecnologías, etc.

El lenguaje de las ingenierías es la matemática y su aprendizaje es fundamental en la formación del ingeniero; esta herramienta siempre le resultará válida aún cuando a lo largo de su vida profesional vayan cambiando las técnicas y tecnologías en uso vigentes en el tiempo de su formación básica.

Cada rama de la ingeniería tiene sus aspectos específicos, pero el autor entiende que el método de adquisición de conocimientos en la Universidad tiene que constituir un Sistema Abierto que permita una gran movilidad para la organización personal del estudiante, facilite la implementación administrativa y garantice el necesario rigor del aprendizaje.

En particular, y limitándonos solamente al campo de la Ingeniería Civil, es necesario aseverar una vez más el papel que juega la enseñanza de la matemática. El autor ha insistido en la necesidad de una formación robusta en matemáticas, porque esta herramienta posibilitará la progresiva adecuación al desarrollo tecnológico que se producirá durante la vida útil de su actividad profesional.

Como resumen de esta posición, se agrega el texto de dos intervenciones que efectuó en Mesas Redondas desarrolladas en la Facultad de Ingeniería de la UBA, en fechas algo lejanas pero que mantienen vigencia.

### **Mesa Redonda FI-UBA, Aula 301, Paseo Colón, H. Ciancaglini - E. Dvorkin-E. Núñez, 16 de diciembre de 2000**

El Ingeniero es una persona capaz de utilizar los conocimientos alcanzados a través de la investigación científica y de la experiencia empírica - en el primer caso ya sea en las ciencias básicas como aplicadas, en el segundo caso en la ejecución práctica de modelos exitosos - teniendo como objetivos el proyecto y/o ejecución y/o fabricación de instrumentos, objetos, construcciones, artefactos o metodología de procesos que faciliten el mejor aprovechamiento del mundo físico por parte del ser humano.

Por tanto, los estudios en la ingeniería tienden a capacitar para la acción eficaz sobre los elementos de la naturaleza, con el objeto de modificarlos mediante la creación de nuevos procedimientos - y la aplicación de aquéllos conocidos y probados - para el mejor uso de los recursos que posibiliten el desenvolvimiento material de la sociedad.

En el caso especial de la ingeniería civil, es necesario tener en cuenta que cada obra es un prototipo, y muchas veces las leyes de semejanza son de incierta aplicación.

Para poder operar con eficacia en el amplio campo del proyecto y ejecución de estructuras, manejo del agua, vías de comunicación y regulación del transporte, cuidado del medio ambiente el cual modifica con su actividad, participación en la producción de energía y su distribución, e intervenir en todos los aspectos conexos propios de los requerimientos del actual mundo tecnológico, debe procurarse una muy buena formación en las ciencias matemáticas, la cual será siempre el apoyo, sustento y herramienta de sus trabajos. Al menos un 20% ó 25% del tiempo dedicado a su formación general debe estar destinado al estudio de las matemáticas formales y del manejo operativo de los sistemas computacionales disponibles o participando en su desarrollo.

Siempre debe tenerse en cuenta el conocimiento empírico, pero también clara conciencia que la sola empiria no es suficiente. Durante su formación como Ingeniero, aparecerá claramente en su concepción de la sociedad política a la cual pertenece y de la cual se nutre, que la ingeniería constituye uno de los pilares de la verdadera fortaleza de las comunidades modernas.

## **Mesa Redonda FI-UBA “II Congreso Internacional de Matemática Aplicada a la Ingeniería y Enseñanza de la Matemática en la Ingeniería”, 16 de Diciembre de 2003**

Galileo ha afirmado que el libro de la naturaleza está escrito en lenguaje matemático. Antes que él, los hombres que buscaban una interpretación del universo físico en las llanuras de la Mesopotamia, en el valle del Nilo o en los espacios de la China milenaria, ya habían intentado utilizar este idioma para alcanzar una comprensión de los fenómenos que constituían la “circunstancia material humana”. Los hombres del mediterráneo hace ya más de 25 siglos desarrollaban la geometría y meditaban sobre el significado de los números para poder, a través de este conocimiento, formular una “predicción” del comportamiento de los fenómenos de su entorno, del producto del propio accionar humano, del movimiento de los astros y de las estrellas y también, si era posible, del propio significado del universo.

Pero la acumulación del conocimiento “comprobable” se magnificó en forma explosiva en los tiempos modernos, y fue el desarrollo matemático el que sirvió de soporte y ariete de este proceso de dominio del espacio físico por medio de los métodos científicos experimentales. Se limitó la ambición de obtener respuestas a “los porqué” o a los “qué” del ser de las cosas del mundo físico, y se aceptó que no era una tarea menor o menospreciable indagar sobre los “cómo”, los “donde” y “cuando”, e inclusive de los porqué de las causas relativas e inmediatas que operaban en el mundo material. La matemática no solo fue una actividad intelectual deductiva desde “principios” o “postulados” de antes de razón, sino también intentos inductivos de interpretación del entorno físico. El investigador sobre lo pequeño y lo grande, el “hombre especulativo y artífice” encontró en las matemáticas la herramienta adecuada. Tomó las matemáticas – con sus metodologías operativas y sus desarrollos formales disponibles – como algo instrumental, funcional, a sus necesidades de indagación y a sus necesidades de materialización de lo que su ingenio “inventaba” para ampliar las posibilidades naturales. El ingeniero fue el artífice de su propio ingenio y el uso de las matemáticas potenció sus propias “creaciones” y enriqueció sus propias Interpretaciones que formuló primero como “conjeturas”, luego como “teorías” para lograr explicación de alguna conclusión ya aceptada y – desde ella – establecer un nuevo punto de partida para conocimientos mayores: el arte de la ingeniería se transforma en ciencias de las ingenierías.

El lenguaje matemático, funcional e instrumental para el ingeniero, debió enriquecerse (el ingeniero era usuario y al mismo tiempo gestor de la ampliación del campo matemático) en la medida que los objetos que el hombre inventaba o “creaba” eran más complejos, los propios instrumentos que posibilitaban el desarrollo eran más refinados, y las dificultades físicas que había que superar iban estando cada vez más alejadas del mundo directo de la percepción de los sentidos. El ingeniero debía educar su capacidad de abstracción de los fenómenos del mundo físico y el instrumento para este proceso es la matemática.

A su vez, hay que diversificar el grado de preparación para este ejercicio, porque lo mismo ocurre en el espacio de las relaciones humanas, en donde el mejor dominio de un idioma permite mayor precisión en la expresión y agudeza de razonamiento; pero no es posible para todos que el buen uso de un lenguaje obligue a cada uno a convertirse en un filólogo. También entre los ingenieros no puede exigirse – ni es conveniente – obligar a todos aquellos con capacidad inventiva y de realización, con imaginación creativa y disciplina para la organización de empresas colectivas, al estudio y dominio de las abstracciones más avanzadas en el mundo de la matemática.

Por tanto, a la pregunta de esta reunión, ¿cuánta matemática tienen que estudiar los estudiantes de ingeniería? contesto: la necesaria. Inmediatamente se me preguntará, ¿cuánta matemática es la necesaria?, y mi contestación es: la necesaria para manejar los problemas físicos o mecánicos o químicos en los distintos niveles de preparación correspondientes a

los requerimientos mínimos profesionales, en cada caso. Esto conduce inmediatamente a preguntarse sobre dichos requerimientos mínimos, y la contestación es: la preparación para el ejercicio de la ingeniería debe contemplar niveles de complejidad crecientes, pero que no deben ser necesariamente cumplimentados por todos los ingenieros. En este sentido, creo que es necesario y conveniente para la sociedad que paga con sus impuestos de educación universitaria, establecer, digamos, “grados” de preparación académica: por ej. a) el Licenciado en Ingeniería, b) el Ingeniero (como hasta este momento lo conocemos entre nosotros: Civil, Industrial, Mecánico, Electricista, Electrónico, Naval, Químico, etc); el Doctor en Ingeniería. Eventualmente el Estado establecerá el alcance de cada Título al ejercicio profesional correspondiente. Y continuando sobre el cuanto se podría agregar: a) en el nivel de Licenciado de Ingeniería yo sugiero unos tres Cursos (semestres) de lo que podríamos denominar genéricamente “Matemática”, más un Curso de geometrías o sistemas de representación más un Curso orgánico de Computación, además de 3 cursos semestrales de lo que podríamos llamar Análisis Matemático (cálculo). En el área de las Matemáticas incluiría la geometría analítica, una buena introducción al álgebra superior tradicional incluyendo series, álgebra lineal, análisis de probabilidades y estadística, matrices y cálculo numérico. En los cursos de Análisis matemático, el convencional del cálculo infinitesimal e integral de una y varias variables, ecuaciones diferenciales e integrales, variable compleja, introducción a la mecánica computacional, todo en un nivel medio de las matemáticas aplicadas a la ingeniería. En resumen, para las matemáticas + geometría + computación,  $(3+1+1) \times 4 = 20$  créditos, o sea para un semestre de 16 semanas,  $20 \times 16 = 320$  horas-aula. Para los análisis y cálculo,  $6+6+4 = 20$  créditos, o sea  $16 \times 16 = 256$  horas-aula. En total,  $320+256 = 576$  horas-aula. b) en el nivel de Ingeniero (lo que en otras universidades se denomina Master o Magister), habrá que agregar 2 cursos de matemáticas superiores, incluyendo la geometría diferencial y el cálculo variacional y de mecánica computacional, o sea  $2 \times 2 \times 4 \times 16 = 256$  horas-aula.

Esto hace un total de  $576+256 = 832$  horas-aula, que sobre un total para la carrera de 240 créditos (3840 horas-aula) representa aproximadamente un 22%.

Desde ya que esta manera de contabilizar los tiempos que un estudiante de ingeniería debe dedicar al estudio de las matemáticas en el aula es solo una manera de encuadrarse dentro del contexto “tiempos” destinados a su formación; no considera lo fundamental que es la capacidad real del candidato, su entusiasmo, la calidad de sus profesores y la receptividad de quien recibe la enseñanza, etc. A mi particularmente no me gusta esta “contabilidad” de tiempo-horas necesarias para lograr una razonable preparación matemática de un ingeniero, pero apunta de alguna manera a explicitar mi opinión general que la preparación matemática es muy importante; que deben optimizarse los recursos de tiempo para cada uno de los niveles de exigencia, y que solamente con una rigurosa formación matemática nuestros ingenieros podrán participar en el seguimiento del desarrollo de la ingeniería, y en la creación misma de la ingeniería. Y tratando, en todo lo posible, alcanzar la formación que les permita participar en la solución científica y tecnológica de los problemas del mundo moderno, el cual, sin ese soporte, no puede sustentarse ni ampliarse.



# Logros y errores en Ingeniería y la educación del Ingeniero



**ANCEFN**

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales