

LA HIDRODINAMICA DEL AGUA PESADA¹

Palabras clave: Ingeniería Química, Flujos con interfaces, cromatografía, capilaridad, mojado.
Key words: Chemical Engineering, Interfacial flows, chromatography, capillarity, wetting.

¿Qué hace un ingeniero químico en la universidad y en el CONICET? Investiga, por supuesto; pero a partir de sus investigaciones también produce hechos concretos, como la planta experimental de agua pesada.

■ Ramon Luis Cerro Siemsen

Profesor Ordinario FIQ/UNL, University of Tulsa,
University of Alabama in Huntsville
Miembro Correspondiente Academia Nacional de
Ingeniería, ARG

alberto.poch@gmail.com

¹ Editor asignado: **Pedro Depetris**

“y como yo soy santiagueño no puedo decir que no...” (1)

Nunca me gusto hablar de mí mismo y menos cantar mis alabanzas. Respondiendo a la cordial invitación de los editores y al aliento de mi gran amigo el Dr. Pedro Depetris me hicieron pensar que podía y debía hacerlo. Hay gente a quien debo mucho y esa deuda tengo que pagarla. De acuerdo con la tradición Aymará, el futuro está detrás nuestro mientras que el pasado esta enfrente. Puedo contemplar mi pasado, pero no puedo conocer mi futuro. No sé qué pasará mañana de modo que esto debo hacerlo hoy. Los recuerdos son efímeros y los datos que no están en el disco de mi computadora son cada vez más difíciles de recordar. Esta Reseña en gran parte son solamente memorias, no tengo acceso a archivos previos a 1997 anteriores a mi última mudanza. Invocando a Paul Valeri, **“recuerdo algunos cientos de caras y la substancia de unos veinte libros, pero no recuerdo lo mejor o lo peor, lo que podía quedar, quedo”**. Mi esposa Frances siempre me recuerda que estamos en esta vida

para aprender. Cuando le pregunto qué es lo que yo tengo que aprender me dice que en primer lugar paciencia y luego reconocer que es lo que me hace falta aprender. Nunca aprendí paciencia de modo que en esta reseña trato de contarles lo que yo aprendí de mis estudiantes como profesor e investigador y de mi familia y amigos como persona a lo largo de las diferentes etapas de mi vida, llena de cambios.

Chakay Manta de ande soy... (2)

Nací en La Banda, Provincia de Santiago del Estero el 15 de septiembre de 1941. Mi padre Ramon, nacido en Santander, España, era comerciante y mi madre, Magda Elvira Siemsen, la hija menor de agricultores inmigrantes alemanes, nacida en Canals, provincia de Córdoba. Mi padre vino a la Argentina con 15 años y una parcial educación que no le impidió ser un lector incansable. Yo le decía que, si en lugar de leer ficción leyera ciencia, hubiera sido doctor. Mi madre con una bondad y paciencia infinita fue la que siempre me alentó en todas las etapas de mi

vida. Soy el menor de tres hijos, con dos hermanas Elvira Adriana e Irene Beatriz. La mayor preocupación de mi infancia era jugar al basquetbol, al futbol, nadar en los canales de riego, pescar en el Dique de Los Quiroga y pasarlo bien con una banda de *changos* que tenían la misma preocupación. En mi vocabulario de niño se mezclaban palabras quechuas que no las reconocí como exteriores al castellano hasta que vi las miradas confundidas de mis compañeros de facultad. Mis maestras de la escuela primaria decían que yo era inquieto y que no me portaba bien.

La escuela secundaria fue el Colegio Nacional Absalón Rojas donde hice amigos inolvidables. Me parecía que nunca volvería a tener amigos como esos, la vida me regaló muchos más. Mi paso por el secundario fue muy agradable y de nuevo sin preocupaciones ya que me portaba mejor. En cuanto a la enseñanza, salvo por un profesor de matemáticas que me enseñó trigonometría, no tuvo grandes hitos. El shock de saber que había en matemática algo más que las cuatro operaciones me

hicieron pensar, ingenuo de mí, que esa era toda la matemática que necesitaba. Los dos honores de mi experiencia secundaria fue ser el abanderado de mi promoción y al mismo tiempo ser elegido el mejor compañero de mi clase. El primero fue una sorpresa y el segundo una gran satisfacción.

Mis padres me regalaron un laboratorio de química de juguete con el cual pasé muchas horas viendo cómo cambiaban de color las soluciones y como aparecían cristales de un líquido claro. Mi otra pasión eran las cosas mecánicas, mi motocicleta y reparar el primitivo lavarropas de mi madre. Si se combinan las dos pasiones es fácil explicar porque terminé en Santa Fe estudiando Ingeniería Química. Es notable cómo se pueden tomar decisiones para toda una vida con tan poca información. Sin embargo, nunca me arrepentí de esa decisión. Así llegué a la Facultad de Ingeniería Química, FIQ de ahora en más, de la Universidad Nacional del Litoral, UNL. Algunos de mis recuerdos fueron las noches de estudio y mate. Comencé viviendo en el Colegio Mayor Universitario, pero poco más de un año después nos mudamos a una casa alquilada donde convivíamos un grupo con los cuales, de los que todavía están vivos, conservo una gran amistad. El paso por el Colegio Mayor, con gente que conservé contacto por muchos años, fue transformador. Aprendí la importancia de una educación humanística. Estábamos en la universidad, no para aprender un oficio sino para educarnos. Algunos de los compañeros de más edad como Carlos Suárez, Atilio Rosso y Francisco "Pancho" Blangetti nos daban el ejemplo. No recuerdo haberme esforzado demasiado en mis estudios ni prestar demasiada atención a las calificaciones de los exámenes. Si recuerdo haber tomado dos exámenes en la misma ma-

ñana y salvarme por milagro de un aplazo. No repetí esa aventura. Fui ayudante en la cátedra de Física con el Dr. Mauricio Lara y luego jefe de trabajos prácticos en la cátedra de Procesos Unitarios con el Ing. Parera que volvía de una estadía en el *Imperial College*.

En la clase de Operaciones Unitarias, fue el Ing. Benett quien me introdujo al libro *Transport Phenomena* de Bird, Stewart y Lightfoot, profesores de la Universidad de Wisconsin, Madison. Todavía conservo mi copia de la primera edición fechada en 1962. Descubrir que todo lo que sucede dentro de un reactor químico está sujeto a leyes expresadas a través de ecuaciones matemáticas me impactó. Muchos años después ese fue el incentivo para ser coautor de otro libro de texto. Me inicié en investigación en el laboratorio del Ing. Parera. Con otro estudiante de apellido Lamartin, (que tenía pasión por la música y fundó el coro de la FIQ) y bajo la mirada crítica del Ing. Poppi (que luego se radicó en Salta) y el Ing. Recalcatti (que fue presidente de la Universidad Tecnológica Nacional) medíamos distribución de tiempos de residencia en reactores tanque agitados. De esta investigación surgieron dos publicaciones. El ver mi nombre en un *paper* me impactó. Todavía no conocía a Ted Davis, profesor de la Universidad de Minnesota, ni le había escuchado decir; "*If it ain't published, it ain't science*". Yo sé que hay circunstancias que pueden bloquear un *paper*, pero incrédulo leo o escucho decir que alguien hizo investigación y no la publicó por esta u otra razón. *Si no está publicado, no es ciencia*.

Luego de un ínterin de un año donde parte lo pasé en el regimiento XVIII de Infantería haciendo la *colimba* y el resto perdido debido a la huelga estudiantil y la renuncia en

masa de los profesores de la FIQ, el Ing. Parera me hizo un contacto con el Dr. J. M. Smith que estaba de visita en la Universidad de La Plata. Smith, que se había trasladado recientemente a Universidad de California en Davis, me prometió ayuda económica para hacer estudios de posgrado bajo su dirección. Así es que el último día del año 1966 partí en Pan American hacia los EE.UU. y arribé en Davis, California, el primer día de 1967. Davis hasta muy poco antes había sido la *University Farm* donde los departamentos más grandes eran los de agricultura y ciencia de alimentos. En Alimentos está el de Enología que tiene una gran conexión con las bodegas de Napa Valley. Hoy es un campus enorme con una escuela de medicina famosa, pero el medio preferido de movilidad todavía son las bicicletas.

Hacer investigación con J.M. Smith fue otra experiencia mixta. Mi título de ingeniero químico de la FIQ y mi paso por el laboratorio de Parera en Santa Fe me ayudaron enormemente. Yo podía diseñar experimentos, hacer planos que los técnicos del taller mecánico entendían, conectar equipos y hacerlos funcionar lo cual me permitió completar mi Master en 18 meses. Este trabajo consistía en usar el valor medio y la variancia de una curva cromatográfica para medir propiedades de transporte, el coeficiente de difusión y la constante de equilibrio de adsorción de un componente. La extensión teórica consistía en incorporar una isoterma de adsorción no-lineal a la teoría existente y luego realizar el mismo ejercicio con componentes no adsorbibles para medir el coeficiente de difusión. Quien está familiarizado con curvas cromatográficas podrá apreciar las dificultades de este experimento. El valor medio de la curva no es problema, pero la variancia está sujeta a la determinación precisa de la lí-

nea de base que era muy difícil de medir en curvas impresas en papel. Para obtener resultados modestamente precisos tenía que repetir los experimentos varias veces para poder obtener un punto promedio. Aun así, mis resultados daban una buena aproximación de las propiedades físicas, pero parecían haber sido dibujados con una escopeta.

Me quedo corto al decir que Smith era exigente. Tuve que enfrentar gran presión y mucha argumentación porque otro investigador que trabajó en este tema antes que yo, tenía resultados que eran mucho más “elegantes”. Solo disminuyó la presión cuando ese otro investigador le comunicó que, si bien había tenido el mismo problema, él hizo muchos experimentos para cada punto de sus curvas y los promediaba. Cuando le conté esto al técnico del departamento, Homer se sonrió y me dijo que ese otro no hizo ni la mitad de los experimentos que yo hice. Si el director presiona a sus estudiantes o becarios solo hay dos resultados, el alumno falsifica los resultados o los defiende con peligro de su sanidad. Aprendí la lección y en mi dirección de becarios y alumnos siempre trabajé con ellos para validar y aceptar los resultados como son, nunca los presioné para hacerlos mejores.

Mi poca afinidad con los temas de investigación y la situación que soporté por 18 meses me hicieron buscar otro director para mi trabajo de doctorado. Con mucho alivio acepté la oferta de Steve Whitaker, también profesor en Davis, para hacer mi doctorado. A Whitaker le debo poder terminar mis estudios. Me considero afortunado porque Steve fue mi director, mi mentor y mi amigo hasta su fallecimiento en 2023. En sus clases aprecié la honradez científica y gran capacidad de reflexión para analizar y estructurar

problemas. Steve no era un experimentalista, pero apreciaba la generación de conceptos que los experimentos sugieren. Su método era simple, sin presión, discutir y evaluar cada paso. Nunca me citaba, era yo el que golpeaba la puerta de su escritorio que siempre estaba abierta. Me dio los recursos y el aliento para diseñar y realizar experimentos que, en ese momento, fueron pioneros y que me permitieron explorar métodos de visualización de flujos que luego usé en mi investigación.

Ese fue el comienzo del tema que ocupó gran parte de mi vida, la HF; *Hidrodinámica Fisicoquímica*. Ese es el título del libro de Veniamin Levich, investigador ruso y discípulo de L. D. Landau, traducido del ruso y adaptado para su publicación en inglés en 1962 por el profesor L. E. “Skip” Scriven de la Universidad de Minnesota. El libro de Levich es una *Opera Omnia* que incluye una variedad de temas que van desde flujos con más de una fase (gas-liquido, liquido-solido, etc.), electrolisis, y capilaridad. El título de mi tesis doctoral fue *Stability of Falling Liquid Films: The entrance Region*. La defendí en el verano de 1970, solo dos años transcurridos luego de mi transición hacia un nuevo director de investigación, Los *films* son a veces traducidos como películas líquidas, pero voy a usar la palabra en inglés que es menos ambigua, nada que ver con el cine. Los *films* líquidos son muy importantes en ingeniería química porque son el vehículo para intercambio de materia entre un gas y un líquido. Indudablemente, el flujo sobre superficies sólidas con distinta geometría es mucho más complejo que un film sobre una superficie plana, pero los conceptos básicos se pueden reducir al flujo de un film uniforme. El perfil de velocidades de un film líquido sobre una superficie plana inclinada es función del espesor del

film, el ángulo de inclinación del sólido y la fuerza de gravedad. Parte de la complejidad de los flujos en equipos de intercambio de materia se debe a fenómenos capilares. En esa época la computación era muy primitiva y no había códigos para hacer CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Todo era programado en FORTRAN y procesado en una IBM que ocupaba un salón enorme con unidades de cinta que parecían quejarse. La novedad de mis cómputos fue la introducción de coordenadas de líneas de corriente para describir los flujos con superficies libres. Hoy, con la disponibilidad de códigos que predicen la forma del dominio de flujo, esas computaciones son solo una curiosidad histórica.

Al terminar mis estudios en Davis, me postulé para dos trabajos postdoctorales. Yo no tenía ningún compromiso con Argentina puesto que mis estudios fueron pagados por mi trabajo como ayudante de docencia primero y luego de investigación. Siempre pensé en volver, pero me interesaba adquirir más experiencia, especialmente en una mega-universidad. Recibí dos ofertas, una del profesor Hanratty de la Universidad de Illinois en Urbana y la otra del profesor “Skip” Scriven de la Universidad de Minnesota en Minneapolis, el que tradujo a Levich. Hanratty era muy conocido y trabajaba fundamentalmente en flujos turbulentos. Scriven trabajaba también en HF y era uno de los investigadores más prolíficos y respetados en esa área de investigación. A pesar de la amenaza del frío de los inviernos de Minnesota, me incliné por Minneapolis.

En agosto de 1970 inicié un viaje que me llevó tres días manejando mi viejo Ford desde Davis a Minneapolis. El campus de la *UofM* está en el medio de Minneapolis a la vera del río Mississippi rodeado

de bares y restaurantes que tienen como clientes profesores, alumnos y toda la gente relacionada con la U. En ese momento el estudiantado sumaba más de 40,000 almas, el estacionamiento era (¡y es!) una pesadilla donde los buenos lugares para estacionar son prácticamente hereditarios entre profesores. Las bicicletas se usan solamente durante el verano ya que la nieve está en el suelo de octubre a marzo. Durante el verano de 1970 me instalé en un departamento a varias cuadras del edificio de IQ, decisión que lamenté durante el crudo invierno de 1971 cuando tenía que hacer esa caminata dos veces por día. ¿Se imaginan un santiagueño en un clima de -20 C? Allí conocí a mi esposa Frances Ann Machala, con quien nos casamos en 1972, que tomó la brava decisión de seguirme a la Argentina y con la que tuve tres hijos, Eduardo, Alejandro y Ana. Los tres nacidos en Santa Fe con doble nacionalidad. Frances dejó una carrera brillante en el *Minnesota Dance Theater* y se vino conmigo a Santa Fe donde todavía es reconocida como una de las pioneras de la danza moderna. Después de 52 años de casado todavía me maravillo y me alegro de que haya tomado esa decisión.

Participar de la *UofM* como mega-universidad y del departamento de ingeniería química que estaba primero en el ranking mundial, fue inolvidable. Los profesores del departamento, grande en relación con otros departamentos de IQ, provenían de las áreas más diversas. El jefe del departamento era Neil "Chief" Amundson, fundador y editor en jefe del *Chemical Engineering Science*. Todos los profesores eran mundialmente reconocidos en sus áreas de investigación. Las relaciones personales con estos profesores durante los almuerzos en el *Faculty Club* me brindaron experiencias que guiaron mi carrera como profesor

e investigador y que fueron de mucha ayuda cuando desde la Argentina buscaba lugares para enviar mis ayudantes cuando no había todavía posgrado en ingeniería.

Mi director, Skip Scriven, era un pionero del análisis de procesos de transición de fases como evaporación/condensación y del fenómeno capilar conocido como efecto Marangoni donde la tensión interfacial juega un rol importante en el movimiento de interfases gas-líquido. Skip era un dínamo de actividad y era, entre otras cosas, uno de los principales editores del *Journal of Fluid Mechanics* de la editorial Cambridge y llevaba a todos lados un enorme portafolio con artículos y revisiones de la revista que él analizaba cuidadosamente durante los "ratos libres". Tuve la gran suerte de tener a Skip Scriven como mi director, mentor y amigo hasta su fallecimiento en 2004. Skip y Steve Whitaker fueron discípulos de doctorado de Robert Pigford, profesor de la Universidad de Delaware y uno de los padres de la ingeniería química moderna. Salvando las diferencias con Newton, yo puedo decir también que mi carrera la hice parado sobre los hombros de dos gigantes, Steve Whitaker y L. E. Scriven.

En Minneapolis me encaminé hacia los flujos de recubrimiento que es como se deposita un film líquido sobre una superficie sólida o substrato, en forma continua. En general el film se seca o reacciona y queda un residuo sólido sobre el substrato, con propiedades específicas. Estos flujos son de gran importancia industrial. La experiencia más linda en Minnesota, aparte de conocer a Frances, fue observar cómo la confluencia de distintas disciplinas, con la ayuda de una sólida formación matemática, se traduce en investigación de primera línea. En los almuerzos del *Faculty Club* los químicos,

ingenieros, biólogos y matemáticos discutían sus problemas de investigación con el entusiasmo que brinda ser un apasionado de su disciplina. Moraleja: los verdaderos investigadores son apasionados por su investigación y tarde o temprano te la cuentan.

"...por el río volveré, a Santa Fe..." (3)

Terminada mi posición postdoctoral en Minnesota, en 1972 volví a la Argentina con muchas esperanzas. Con Scriven y otros estudiantes extranjeros y postdoctores nos preocupaba lo que bautizamos como el "*body rejection problem*", la reacción que se genera cuando en una institución se introduce un cuerpo extraño. Este era un problema reconocido en Minnesota porque había una gran cantidad de estudiantes extranjeros y muchos de ellos regresaban a su país de origen ya sea por voluntad propia o porque tenían un compromiso que los hacía regresar. Mi reinserción fue mixta ya que me incorporé a lo que ese momento era el Departamento de Graduados de la FIQ, dirigido por el Dr. Alberto Cassano.¹ Esto me consiguió un cargo de Ciencia y Técnica y el apoyo de Alberto y la gente del departamento. Desgraciadamente ya el grupo existente estaba confinado a un gran laboratorio sin espacio para integrarme. Fue un amigo de los primeros tiempos, el Ing. Ceretto en ese momento profesor de la cátedra de termodinámica, que me dio una mesa dentro de una oficina grande que se usaba para atender consultas de los alumnos. Yo estaba separado del resto del cuarto por un gran armario.

Luego de algunos meses flacos conseguí un proyecto de Ciencia y Técnica con becarios y algún dinero para experimentos. Tiempo después nos mudamos al nuevo edificio de

la FIQ donde Posgrado ahora tenía todo un piso y yo, laboratorio y oficina propia. Agradezco la ayuda de Cassano que me instruyó en la navegación de la burocracia y el arte de conseguir subsidios. Menciono los lugares donde hicieron su doctorando y donde están ahora de los cuatro primeros alumnos/becarios; Julio Deiber (PhD Princeton, INTEC), Vicente Costanza (PhD Princeton, INTEC), Dardo Marqués (PhD, Wisconsin, ITBA) y Perla Balbuena (PhD UTexas Austin, *O'Connor Chair Professor Texas A&M*). No me acuerdo de fechas, pero todos iniciaron sus estudios en EE.UU. dentro de los años 70. Salvo Marqués todos fueron aceptados para hacer estudios y posgrado con soporte de las universidades gracias a las relaciones que yo pude establecer en Davis y Minneapolis. Dardo estuvo un tiempo en el proyecto de Agua Pesada y entró a Wisconsin con beca de BID-CONICET.

Con Julio Deiber hicimos un trabajo experimental y teórico sobre flujos de films dentro de un cilindro horizontal giratorio y con Marques y Costanza abordamos un tema, parte analítico parte computacional relacionado con el flujo de un film arrastrado por un sólido, conocido como flujo de Landau-Levich. Poco tiempo después se incorporó Osvaldo Campanella (PhD U Mass Amherst, *Carl Haas Chair Professor Ohio State*) y Jorge Galazzo (PhD Caltech, VP Science and Technology, Corbion). Con Campanella abordamos los flujos en la parte exterior de un cilindro rotante, ver Figura al pie del párrafo. Con Galazzo y Pedro Depetris trabajamos además en el uso de caolines argentinos para el recubrimiento de papel. Si bien a primera vista podría parecer que todos estos trabajos son aplicaciones muy diferentes, el elemento común es la hidrodinámica fisicoquímica con algunas variaciones reológicas.

En casi todos estos trabajos hubo actividad experimental al lado de análisis teórico. Los experimentos ponen los pies en la tierra. Algunos de mis trabajos más referenciados provienen de esta época.

■ EL PESO DEL AGUA PESADA

A principios de 1975 recibimos la visita del ingeniero Aníbal Núñez, también Ingeniero Químico de la FIQ, que trabajaba en la Comisión Nacional de Energía Atómica, CNEA. Núñez buscaba algún grupo

ya formado para hacer un estudio de factibilidad con la idea de diseñar una planta piloto para demostrar la fabricación de agua pesada. Para la planta piloto, como premisa, debíamos explorar el intercambio isotópico entre agua y ácido sulfhídrico, que se conoce como proceso GS (*Girdler-Sulfide*). La CNEA había elegido el sistema agua pesada-uranio natural para los reactores de potencia y la disponibilidad de agua pesada para Atucha y futuros reactores era una necesidad evidente. Como era un proyecto típico de in-

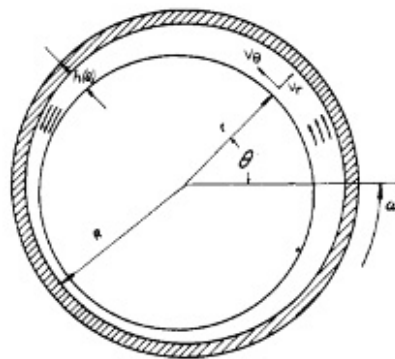
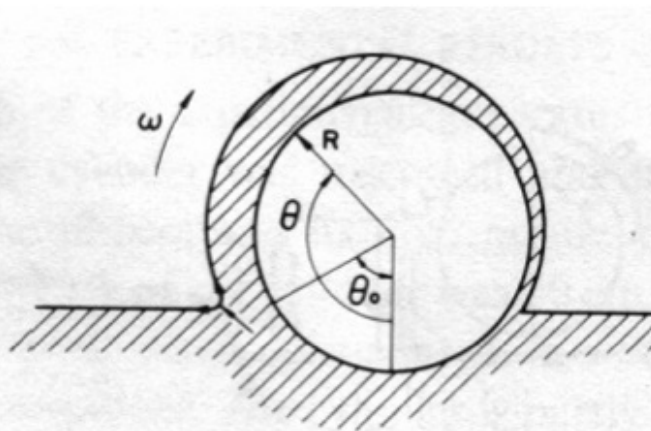


Figura 1a



Esquemática de flujos dentro y fuera de un cilindro rotante. Estos flujos aparece luego en muchas otras investigaciones.

geniería química no nuclear, estaba dentro de lo que podíamos hacer y en acuerdo con Cassano, aceptamos el desafío. A mediados de 1975 firmamos un convenio de cooperación para iniciar estas tareas. También a mediados del 75 se creó el INTEC, sobre la base del personal del Departamento de Graduados de la FIQ. El principal argumento para crear el INTEC fue la participación del personal en este convenio institucional con CNEA. Con su capacidad de organización, Cassano navegó la burocracia y terminamos firmando un acuerdo entre la CNEA, el CONICET y la UNL. No puedo decir que sin este proyecto tal vez no existiría INTEC, pero sin duda sería diferente.

En 1973 sucedió otro hecho, fortuito pero importante. Fue nuestra participación en un simposio para promover la educación de posgrado en ingeniería. En ese momento no había ninguna facultad de ingeniería en la Argentina que otorgara títulos de posgrado. Este simposio estaba patrocinado por el SENID, el Servicio Naval de Investigación y Desarrollo cuyo director era el entonces Capitán de Fragata y Doctor en Física de Bariloche Carlos Castro Madero. Dentro del SENID el hombre de confianza de Castro Madero y que estaba a cargo de la organización del Simposio era el Capitán y Doctor en Física Amílcar Funes. El Dr. Funes era marino y su doctorado era de una universidad de EE.UU., pero no recuerdo los detalles. El Primer Simposio para el Posgrado de Ingeniería se hizo en Buenos Aires con la asistencia de profesores y administradores universitarios de todo el país. Funes me pidió y acepté ser el presidente de las sesiones. Con Funes creamos una amistad muy cordial, salvando la diferencia de edad e institucionales, lo que ayudó en las etapas siguientes del proyecto. Al año siguiente, después del *coup* militar, Castro Madero fue designa-

do presidente de CNEA y trajo a Funes como asesor del entonces grupo de agua pesada de la CNEA. Con la llegada de Castro Madero el proyecto se reforzó. Dentro de CNEA, el Ing. Cosentino presionaba por respuestas en la tecnología de agua pesada ya que por razones políticas la disponibilidad de agua pesada no estaba asegurada. Esto comprometía la construcción de reactores de investigación, el mantenimiento del stock del reactor de Atucha y de los futuros reactores contemplados en el Plan Nuclear.

A fines de 1976, luego de más de un año de análisis, yo hice una presentación en la dirección de CNEA para definir la magnitud del proyecto. En esa reunión, en la que participó Castro Madero, uno de los argumentos principales era que una planta piloto de este proceso no tenía realidad. Una planta piloto se hace para probar un proceso que no existe, el GS era probado y, salvo detalles, conocido. Por otra parte, aun para hacer algunos mililitros de agua pesada se necesitaba circular grandes cantidades de agua con el agravante que manejar sulfhídrico a presión es un serio problema de seguridad. Los sistemas de control y seguridad tendrían que ser prácticamente los mismos que los de una planta industrial. Nuestra propuesta era diseñar y construir una planta con producción continua de 20 toneladas por año. El argumento se reforzaba con la posibilidad de que 20 toneladas no solo servirían para mantener el inventario de la central de Atucha y otros proyectos de CNEA sino que podría tomarse como un módulo que permitiría hacer plantas similares o, con poco cambio de escala, para obtener total independencia del mercado internacional de agua pesada. Castro Madero entendió mis argumentos, pero tomo la decisión de producción intermedia, la planta se diseñaría para generar 2

toneladas por año. Fue una decisión de compromiso, pero acertada porque ese tamaño era de una planta industrial y la producción tenía valor estratégico. Se firmó un nuevo convenio y el nombre oficial asignado al proyecto fue Planta Modelo Experimental de Agua Pesada, PMEAP. Yo fui el director del proyecto desde su inceptión hasta que fue terminado en 1983.

El proyecto comenzó con los jóvenes investigadores y alumnos de un posgrado que no daba ningún título. Con la firma del convenio PMEAP y el cambio de dirección de la UNL, se liberaron algunos cargos de Ciencia y Técnica que el rector peronista usaba para sus guardaespaldas. La incorporación mayor de nuevos jóvenes investigadores fue a principios de 1977. En 1977 reclutamos intensamente para poder crear un grupo con buena capacitación, diversidad de formación y el tamaño suficiente para poder enfrentar este proyecto multidisciplinario. Un proyecto de diseño nunca incluye solamente ingenieros químicos, salvo que sea muy específico y reducido. Necesitábamos, además, químicos, ingenieros mecánicos, eléctricos y de computación. Pero además incorporamos ingenieros industriales, físicos y matemáticos. Vinieron de Rosario, Tandil, Río Cuarto, San Juan, Mar del Plata, en fin, de todo el país. Los reclutados eran de universidades nacionales, otros de la Tecnológica y tal vez alguno de una universidad privada. En general eran todos muy capaces, ansiosos de unirse a un proyecto que no era solamente el diseño de una planta sino la decisión de generar tecnología propia y demostrar la capacidad de los ingenieros y científicos argentinos. No estaban todos formados en las necesidades específicas de una planta química, pero dictamos unos cursos introductorios para salvar las necesidades básicas. El resto del *training* fue "on the job".

La organización estaba centrada en los grupos de tareas con temas específicos. Creamos un grupo de Procesos que se encargaba de coordinar el diagrama del proceso GS y de los procesos auxiliares como la planta de tratamiento de agua, la planta de fabricación de sulfhídricos y la planta de desechos, Teníamos un grupo de Equipos que se especializaba en los métodos más eficientes para diseñar equipos (torres de intercambio gas-liquido, intercambiadores de calor, etc.) o adoptarlos (bombas, compresores, etc.). Teníamos un grupo de Control que evaluaba las técnicas y elementos de hardware y software para el control de procesos, un grupo de Físicoquímica que en coordinación y con el valioso aporte del grupo del Labo-

ratorio de Físicoquímica de CNEA analizaba y validaba los datos relacionados con el comportamiento del sistema agua/agua pesada/sulfhídrico y un grupo de Mecánica que se ocupaba del diseño de cañerías y las especificaciones para fabricar los equipos de proceso. Como corolario a la importancia del proyecto teníamos también un grupo QA (*Quality Assurance*) que no solamente verificaba toda la documentación que se emitía, sino que además incursionaba en árboles de falla y sistemas de predicción de eventos. Cada uno de estos grupos tenía un jefe/responsable y un número de miembros conmensurable con las tareas. No voy a dar nombres de los miembros de los grupos, ni siquiera de los que fueron los jefes de grupo porque de memo-

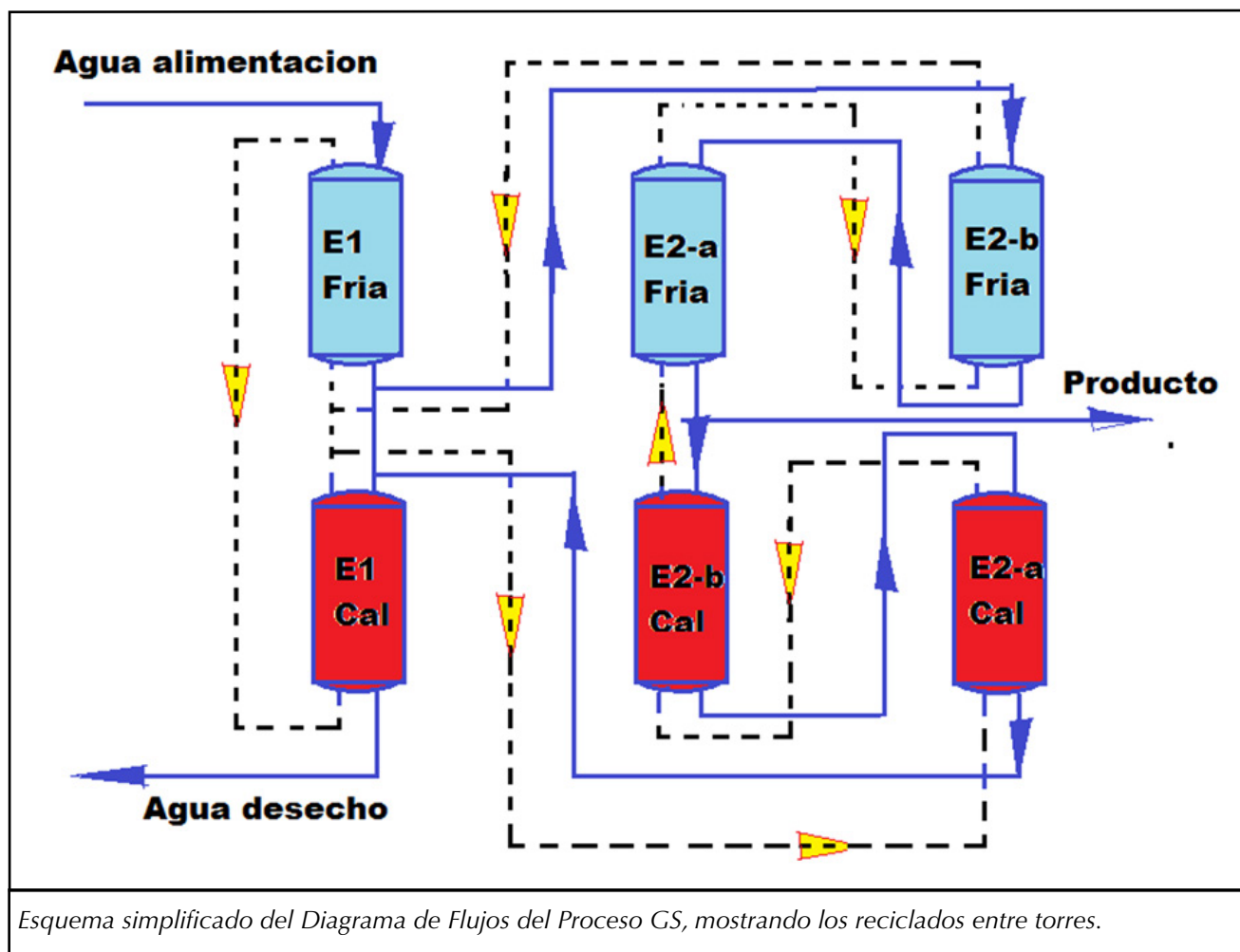
ria me voy a olvidar de algunos. Los nombres de los participantes los incluyo en un "cuadro de honor" que hice de memoria y con la ayuda de los doctores Leone, Vecchietti y Saita. Desde ya mis sinceras disculpas si omití alguno o si me equivoqué en el nombre.

Desde el comienzo, el enfoque fue usar la mejor herramienta conocida, diseño asistido por computadora (CAD), que por supuesto no teníamos. Hacer diseño de procesos hoy sería inconcebible sin el uso de un simulador de procesos. Un simulador, básicamente hace balances de materia y energía de los equipos de proceso. Hoy hay simuladores que incluyen, entre otras cosas, costos y control. En 1977 queríamos

Cuadro de Honor de la PMEAP

Hugo Roque Andrada, Silvina Antille, Arturo Aran, Luis Arri, José Maria Arolfo, Jorge Arroyo, Miguel Bagajewicz, Miguel Baltanas, Perla Balbuena, Leo Beltrami, Eliana de Bernardes, Juan Bressan, Claudio Cabrera, Enrique Campanella, Jaime Cerda, Dante Chiavassa, Mario Chiovetta, Rene Coutaz, Carlos Cravero, Mario Didier, Ernesto Didier, Bartolome Drosdowicz, María del Carmen Real de Genesio, Roberto Godoy, Luis Gribaudo, Oscar Iribarren, Nils Kastrup, Norberto Labath, Horacio Leone, Gerardo Lopez, Jacinto Marchetti, Dardo Marques, José Marta, Raul Massera, Roberto Mato, Tomas Melli, Carmelo Militello, José Monella, Daniel Negri, Antonio Olazarri, Oscar Ortiz, Antonio Pareja, Mario Passegi, Francisco Pedro, Rubén Quiroz, Raúl Ravera, Juan Carlos Roggiano, Rubén Roldan, Amelia Rubiolo, Carlos Alberto Ruiz, Estela Ruiz, Fernando Saita, Alejandro Schiliuk, Carlos Schneider, Jorge Schubert, Zvonko Spekuljack, Livio A. Strada, Bruno Tolomei, Arnaldo Valassa, Aldo R. Vecchietti.

Cuadro de Honor: Esta es la lista de mis colaboradores en el Proyecto PMEAP. Esta es la gente que con su dedicación lo hizo posible.



usar un simulador, pero no teníamos ninguno de modo que tuvimos que crearlo. El primer intento (1976) lo llamamos ANCESTRO porque fue el que generó los otros. Entre 1976 y 1979, prácticamente durante la etapa más crítica del diseño, usamos el PROgrama de Simulación de PROCesos. PROSPRO era un simulador secuencial, es decir la planta se introduce como un esquema gráfico (grafo) orientado y la computación va transfiriendo los resultados de los balances de materia y energía de un equipo a otro siguiendo una secuencia predeterminada (Ver Cerro y col., 2023). En plantas químicas hay muchos reciclo, debido a recuperación de materias primas por baja conversión de reactores. El proceso GS es un grafo con muchos *loops* como se aprecia en la figura siguiente.

Para resolver algunos equipos es necesario tener datos que dependen a su vez del resultado de ese equipo. Los simuladores secuenciales usan métodos iterativos, algunos de ellos bastante complejos. Entre las décadas de los 60/70, la actividad en simulación de procesos en ingeniería química se expandió y fue nuestro trabajo asimilar esa información y mejorarla cuando fuera posible. Estos avances incluían entre otros, *Flowsheeting*; las técnicas para enlazar el grafo y linealizar la secuencia de computación, estrategias para la solución de sistemas de ecuaciones, algoritmos para *rasgar* los grafos con reciclo, esquemas para agilizar convergencia y mantener la computación dentro de un rango con realidad fisicoquímica, estrategias para diseño de sistemas de intercambio

de calor y estrategias para diseño de sistemas de separación.

A fines de 1979 se hizo evidente que la magnitud de información del proceso era más grande de lo que podía manejarse con software standard. Con esta preocupación adquirimos un programa de administración de base de datos (DBMS), una base de datos industrial. En ese entonces *machine learning* estaba en pañales, de manera que los ingenieros de computación del grupo contribuyeron no solamente para adaptarla sino para instruir a todos los participantes. Modificamos PROSPRO asimilando la base de datos al simulador de procesos. Esto generó SIMBAD, un simulador asociado a una Base de Datos. SIMBAD fue una verdadera innovación. Ignoro si al-

guna industria ya tenía simuladores con esa característica, pero nosotros fuimos los primeros en publicarla en una revista internacional (Montagna y col., 1987). Como soporte de este grupo, que llegó a tener cerca de 40 personas en 1978, tuvimos mucha colaboración de instituciones, otras universidades y aun de la industria nacional. Profesores de las universidades de La Plata y San Luis nos dieron apoyo en algunos aspectos de Control, el apoyo de Laboratorio de Fisicoquímica de CNEA en las propiedades del sistema y la valiosa cooperación con el grupo de materiales de CNEA y del ITBA. Mas avanzados en el proyecto, cuando la planta ya estaba en construcción, ingenieros de Petroquímica Bahía Blanca nos alertaron de los problemas de puesta en marcha de una planta nueva. Tuvimos además un consultor que asesoraba al grupo de mecánica en problemas específicos como el efecto de viento en grandes estructuras y la rigidez necesaria para impedir que las torres se muevan demasiado. Este fue otro baneo, físico del Balseiro, Dr. Walter Mulhall.

CNEA nunca nos prohibió publicar. Todo lo que estaba relacionado con el proyecto PMEAP era dominio público y realmente, salvo difusión, publicar información del proceso no tenía sentido. Sin embargo, la investigación en diseño por computadora tuvo sus frutos con una serie de publicaciones relacionados con simulación continua y dinámica de procesos y con estrategias de diseño. Estos *papers* reflejan la calidad de la gente involucrada en el proyecto. Si bien, para un grupo grande de gente y seis años de trabajo no parece eficiente, debemos recordar que el PMEAP no era un proyecto de investigación. Aun así, la mayoría de los *papers* fueron publicados en revistas internacionales. La primera y mayor preocupación fue de llevar a cabo

el diseño y construir la planta. Las publicaciones fueron un dividendo importante pero no primario. A pesar de ser una época de mi vida de baja producción científica, nunca me arrepentí de haber trabajado en este proyecto.

■ LA ALEGRÍA DEL ÉXITO

PMEAP requería un esfuerzo importante. Los jóvenes investigadores, becarios y personal de apoyo lo brindaron con gusto y sin regatear. Lo que más me impresionó fue la avidez con que asimilaban nuevos conocimientos. La lectura de *papers* sobre diseño y temas relacionados era una actividad que en muchos casos era colectiva, no personal. Ese nivel de inteligencia y capacidad de estudio y trabajo, creo que hay pocos lugares que lo pueden obtener. En los EE.UU., MIT y otras universidades de primer nivel, en la Argentina me imagino, el Instituto Balseiro.

No voy a entrar en detalles porque lo haría muy largo de manera que solo voy a mencionar los eventos importantes. En el otoño de 1979, se completó el diseño básico de ingeniería de la PMEAP, cumpliendo con el cronograma que habíamos acordado con CNEA. En su momento tuve que convencer a algunos de nuestros ingenieros que cumplir el cronograma era muy importante para mantener la confianza de los que nos habían encomendado este proyecto. Hubo algunos errores, muy pocos gracias a nuestro QA, y algunos cambios posteriores debido a nuevos eventos, pero esto es inevitable en un proyecto de gran magnitud. Es posible que alguno de esos cambios se hubiera evitado si demorábamos otros tres meses o seis meses, o un año. No hay probabilidad de error cero, no hay perfección en los plazos finitos, solo los obtendríamos en teoría, si extendiéramos el proyecto indefinidamente. Me

acuerdo de que el Dr. Funes me preguntó: "Cuando la planta esté terminada, ¿va a arrancar?". Mi respuesta fue: "No, ninguna planta química arranca apretando un botón, van a pasar días y semanas antes de que todo marche al mismo tiempo".

El diseño de una planta química, sin contar la ingeniería de detalle, genera una enorme cantidad de información. Las plantas tienen **estructura**, que se describe en los diagramas de flujo (*Flowsheet*) y los diagramas de procesos e instrumentos (PID), y **elementos** funcionales que se describen en hojas de especificación de equipos y materiales, normas y prácticas recomendadas de cada uno de esos elementos. Se debe documentar no solo el diseño de una torre de intercambio gas-líquido que pesa 30 toneladas sino una válvula de control o instrucciones específicas de instalación de instrumentación. Cada uno de estos documentos lleva la firma del jefe de grupo que lo generó, la firma del jefe de QA que lo verificó y mi firma como responsable final del proyecto. Esta información se organizó en seis carpetas que contenían desde una introducción con la descripción del proceso GS hasta el último detalle de todos los equipos e instrumentos de las plantas auxiliares de tratamiento de aguas y desechos más la de fabricación de sulfhídrico.

En la primavera de 1979 se hizo la licitación pública para generar la ingeniería de detalle y la posterior construcción de la PMEAP. Esta sería construida en el predio de la Central de Atucha, adyacente al primer reactor nuclear argentino de potencia. El set de seis carpetas con las instrucciones legales introducidas por CNEA configuraba un "paquete" que se vendía, si no recuerdo mal, a unos U\$S 3000. No estoy seguro del número de paquetes que se vendió, pero creo que estaba cerca de 20. Tal

vez la licitación pública fue un error, ya que hubo sospechas de que algunas fueron compradas por empresas que actuaban como *testaferros* de embajadas, pero este proyecto no era secreto, no había nada en las carpetas que fuera confidencial aunque hacia más fácil para otro país seguir nuestro camino. Finalmente, al abrir los pliegos hubo un número bastante menor de ofertas ya que CNEA promovió la asociación de empresas con distintas cualidades para asegurar que pudieran realmente cumplir con su ejecución. La licitación fue adjudicada al consorcio Astra-Evangelista, dos empresas conocidas y que tenían participación previa en obras de CNEA. Para mayor seguridad de la capacidad de ejecución, CNEA negoció con el consorcio la incorporación de personal adicional con experiencia en ingeniería de detalle. En todos estos pasos la Dirección de Agua Pesada con su director Ing. Aníbal Núñez y el asesor Dr. Amílcar Funes fueron especialmente importantes para asegurar el éxito del proyecto. La construcción de la planta comenzó en 1980. La Dirección Agua Pesada coordinó la interacción de nuestro grupo con la empresa contratista y poco a poco la planta fue tomando realidad. El ver la obra crecer fue exhilarante. He tenido conversaciones con otros ingenieros que tuvieron experiencias similares y todos coinciden en que es una sensación única. Al poco tiempo comenzaron a aparecer las máquinas que construían los edificios auxiliares y las fundaciones de los equipos de la planta.

En 1976 se creó la fundación ARCIEN. La creación de ARCIEN es contemporánea con la creación de otras fundaciones asociadas al CONICET. La idea era usar las fundaciones para administrar los fondos de los institutos y de los subsidios provenientes de otras instituciones, incluido el CONICET. Las funda-

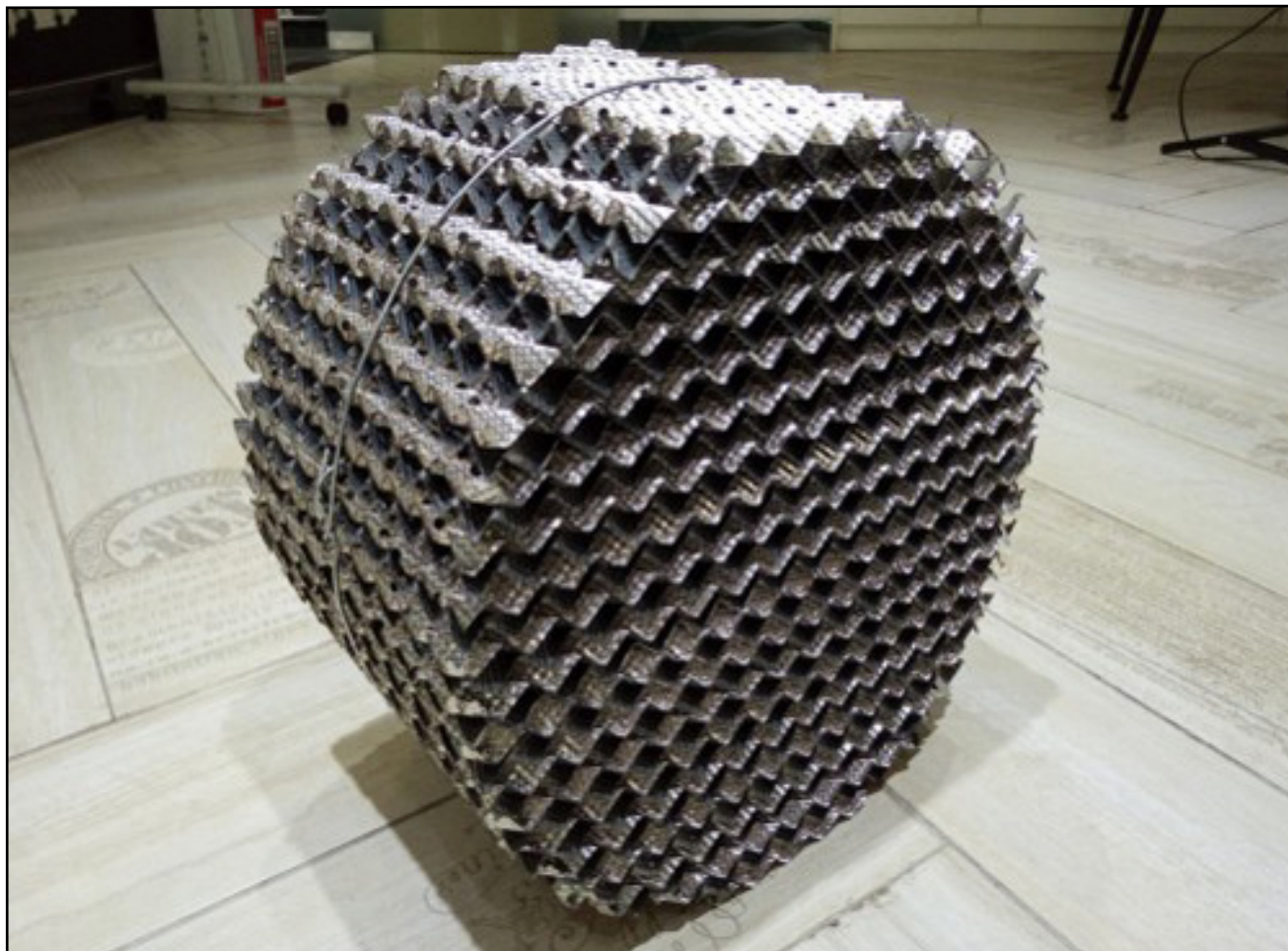
ciones tenían una estructura legal y de contabilidad que facilitaba la labor de los investigadores y cubría responsabilidades legales. ARCIEN estaba además inscrita como importadora/exportadora por lo cual se podía utilizar para comprar equipos de investigación en el exterior. En años de gran inflación y con altos intereses, la fundación manejaba el dinero y generaba fondos adicionales que luego se reinvertían en los institutos. Teníamos una contadora y un asesor legal. La contadora tenía instrucciones precisas de que en todo momento los fondos de subsidios o ingresos adicionales debían estar en los libros de contabilidad con absoluta identificación. Yo fui el presidente de ARCIEN desde su creación en 1976 hasta que yo me fui del país en 1987.

En 1980 ya el programa BID-CO-NICET estaba en marcha, la creación de CERIDE y la obra de construcción del Centro Regional ya comenzaba de manera que el rumbo que tomaba INTEC no coincidía con la premisa que creo el proyecto PMEAP. Algunos de los que habían integrado PMEAP decidieron proseguir con otras investigaciones o viajar al extranjero para proseguir estudios de posgrado a través de la financiación BID-CONICET. Surgió entonces la necesidad de preservar el grupo de aquellos en los que la pasión era la investigación en diseño y el desarrollo de procesos. Con ese objetivo, el 6 de septiembre de 1980, se fundó INGAR con una configuración diferente a los institutos típicos de CONICET. El primer paso fue la creación de INGAR por la Fundación ARCIEN y el segundo paso fue firmar un convenio de cooperación entre ARCIEN y el CONICET para el funcionamiento de INGAR. El convenio que se firmó en septiembre de 1980, con la capacidad privada de contratación de ARCIEN le daba también a INGAR una capacidad,

única en Argentina, de interacción con la industria. La mayoría del personal técnico e investigadores de CONICET que estaban en INTEC y que participaron en la PMEAP fueron transferidos, con su aprobación, a INGAR. Yo fui director de INGAR desde su fundación en 1976 hasta que renuncié en 1987.

La capacidad de ejecutar proyectos de INGAR tiene muchos ejemplos, pero voy a citar solamente dos que son los más grandes y con mayor significado. A principios de 1982, durante la guerra de Malvinas, la refinería de YPF de La Plata tuvo problemas con la provisión de sulfolano, que se usa como solvente en el proceso BTX que separa benceno, tolueno y xilenos. Los proveedores eran empresas inglesas. Luego de conversaciones con los ingenieros de la refinería, INGAR se abocó al diseño de una planta de sulfolano para cubrir la necesidad de la refinería más algún adicional para exportación o expansión del proceso existente. La carpeta con planos y hojas de especificaciones se entregó unos días antes del colapso de Malvinas, pero la planta nunca se construyó. No me extrañaría que todavía compráramos sulfolano de los proveedores ingleses. Alrededor de 1983 la empresa argentina SADE se presentó con ARCIEN a una licitación pública para la remodelación de la torre desmetanizadora de Petroquímica Bahía Blanca con la ingeniería básica del proceso a cargo de INGAR. Este proyecto no era un proceso nuevo, pero utilizaba relleno ordenado e internos de la torre diseñados por los ingenieros de INGAR, ver figura a continuación.

Perdimos la licitación por ser unos US\$ 1000 más caros que Sulzer sobre un total de alrededor de medio millón de dólares. A pesar de haber hecho contactos con directivos y miembros del directorio de



La foto muestra una sección de un relleno ordenado con laminas corrugadas, construida bajo diseño de INGAR. Rellenos de este tipo se usan en columnas de destilación de agua pesada.

PBB para enfatizar la importancia de un desarrollo de esta naturaleza, la decisión de PBB nos aseguraron, fue puramente económica. En ambos casos la realidad era que si bien algunos de nuestros compatriotas declamaban la necesidad de desarrollo industrial no estaban dispuestos a *jugarse* para realizarla.

■ LA AGONÍA DE LA DERROTA

Un día de 1983 nos despertamos con la noticia de que el país tenía una deuda externa enorme. El gobierno democrático tenía las manos atadas por esta deuda y decidió cancelar casi todos los proyectos del Plan Nuclear incluida la PMEAP. En

ese momento la PMEAP ya estaba un 80% construida, ver figura siguiente.

Los edificios ya se habían completado, las torres y los equipos grandes ya estaban instalados, la planta de tratamiento de agua ya funcionaba, los compresores, piezas críticas para el funcionamiento de la planta y el hardware para el control automático, ya estaban en la Argentina. No conozco cual fue la ganancia de nuestro país con estos acuerdos, pero la pérdida de la PMEAP y otros proyectos mayores del Plan Nuclear, más que perder la capacidad de producir agua pesada, fue un paso hacia atrás en nuestro desarrollo industrial.

La cancelación del proyecto fue una decepción muy grande para todos los que trabajamos en él. Para empeorar las cosas las nuevas autoridades del CONICET nos miraban como si fuéramos parte del gobierno militar. En un viaje a la central de CONICET en Buenos Aires me encontré con el nuevo jefe de Institutos, el ingeniero químico Villar, también graduado de la FIQ. En ese encuentro Villar me acusó abiertamente de que “nosotros” estábamos en conjunción con el gobierno militar. Testigos de este intercambio un poco apasionado fueron un par de nuevos empleados de CONICET, un excompañero mío de la FIQ y la esposa del hermano de este compa-

ñero, ambos estuvieron presos un tiempo en Trelew. Era obvio, con las restricciones que nos impusieron en presupuesto y nuevo personal, de que yo era "persona non grata" en el nuevo CONICET. La situación económica del personal de INGAR, como la de todo el país, se hizo más crítica aun con la austeridad que siguió al acuerdo para el pago de la deuda externa.

Incluyo estos comentarios porque explican mucho de lo que vino después. Una parte importante de los ingenieros y científicos que estaban en INGAR no eran de la carrera de investigadores sino profesionales. Los que optaron por posgrado e investigación se fueron al exterior o terminaron el posgrado en Santa Fe. Pero una parte de este grupo se fue de INGAR. Todos, por suerte, entraron a la industria o crearon grupos de asesoría y, de alguna manera, siguieron participando en el desarro-



Vista panorámica de la PMEAP. Año 1983. Al frente edificios de administración y talleres. Al fondo área de procesos con las torres de intercambio gas-líquido. La estructura a la izquierda de las torres es la antorcha que se usa para quemar el sulhidrico durante emergencias.



A principio de 1983, una buena parte de los ingenieros y científicos que trabajaron en el proyecto, visitaron la planta en construcción en Atucha.

llo industrial. Afortunadamente, un buen número continuó, aguantaron la debacle económica de fines de los 80 y siguieron haciendo proyectos.

En 1985 recibí una invitación para incorporarme como miembro correspondiente a la Academia Nacional de Ingeniería de Argentina. En 1986 volví a Buenos Aires para hacer la presentación y la ceremonia de incorporación a la academia. A la presentación atendieron muchos amigos y entre ellos estaban, por supuesto, Núñez, Funes y Castro Madero. No sé cuál fue el rol de Castro Madero en mi incorporación, pero si la hubo, siento que es un consuelo para mí y para todos los que trabajaron en la PMEAP.

A principios de 1986 recibí una oferta de Brian Higgins, que era el jefe del Departamento de Ingeniería Química, para pasar un sabático de tres meses en Universidad de Cali-

fornia en Davis. Brian es discípulo e hizo su PhD con Scriven. Como movilizar mi familia por tres meses no era factible, Scriven me invitó a pasar el resto del año en la Universidad de Minnesota. Partimos en febrero de 1986, como una aventura para la familia. Yo ya era profesor titular ordinario de la FIQ por concurso ganado en 1983. El decano de la FIQ me dio licencia para estar ausente el resto del año, pero en junio cambió de idea y me conminaron a volver. Esa fue la gota que rebasó el vaso. El rechazo de la FIQ y una oferta de la Universidad de Tulsa en Oklahoma me hicieron renunciar a la UNL y CONICET. Desde 1987 soy residente y desde 1991 ciudadano de EE.UU.

La decisión fue muy difícil y nos afectó a todos. Edu y Alex tenían muchos amigos y jugaban en las divisiones inferiores de rugby de Charoga. Edu que terminaba su primario fue admitido para proseguir estudios

en el Colegio de Inmaculada. Ana con cinco años fue la que menos se enteró. Frances lo sintió mucho porque su contacto con el medio artístico de Santa Fe era muy grande y en su estudio de danza moderna ya tenía una cantidad enorme de alumnas y amigas que todavía conserva. El grupo de Frances tuvo actuaciones en el teatro municipal con la orquesta sinfónica de Santa Fe. Mi familia de Santiago, mi madre todavía vivía, inconsolable. Dejar la gente de INGAR me costó mucho. Afortunadamente cada vez que vuelvo a Santa Fe me tratan como si nunca me hubiera ido. Con el tiempo todos nos acostumbramos y ahora tengo una gran familia de hijos y nietos *americanos*.

■ SABÁTICO EN DAVIS Y MINNEAPOLIS

En Davis y en Minneapolis me pidieron que dictara el curso de diseño de procesos, el *capstone*, es decir se



Esta foto fue tomada en uno de mis viajes recientes en una reunión que tuvimos con algunos de las ex-PMEAP. Toda reunión social en Santa Fe incluye cerveza.

considera como el final de los estudios. En ambos casos me pidieron que dictara un curso que estuviera a la altura de los nuevos desarrollos de ingeniería de procesos porque sabían de la experiencia con la PMEAP. La necesidad de Minneapolis era mayor ya que coincidía con la visita de acreditación de la carrera y querían mostrar que en esa área cumplían. En Minneapolis tuve la suerte de tener a uno de mis jefes de grupo de la PMEAP, el Dr Tomas "Tommy" Melli (PhD Minnesota, Exxon-Mobil) como ayudante durante las clases. Tommy estaba haciendo un doctorado con Scriven y me ayudó a instalar SIMBAD en la computadora de la *U of M* para que los alumnos del curso de diseño de procesos usaran un simulador en su proyecto final.

Whitaker sabía de mi frustración y me hizo un contacto con el Dr Ray Flumerfelt que en ese momento era jefe del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Tulsa, Oklahoma. No sé qué le dijo Whitaker a Flumerfelt, pero este me ofreció un cargo de profesor titular el mismo día de mi visita. Recuerdo que, como parte de mi entrevista en Tulsa, tuve una conversación con el *Provost* de la universidad que era un profesor de literatura inglesa que se especializaba en la obra de James Joyce. En nuestra conversación yo le confesé que había intentado leer el *Ulises* varias veces, pero nunca pasé de la tercera página. Pero por otro lado había leído el *Portrait of the Artist* y me gustó mucho. Al volver a la oficina de Flumerfelt este me preguntó que le había dicho yo al *Provost* que lo llamó por teléfono y le dijo algo así como "no lo dejes ir".

■ THE UNIVERSITY OF TULSA, OKLAHOMA

El 1° de enero de 1987, partimos desde Saint Paul, Minnesota hacia

Tulsa OK. Mis dos hijos varones, Edu, Alex y yo en un camión donde llevábamos los pocos muebles que habíamos acumulado y Frances con Ana en nuestro auto. Alquilamos una casa en un suburbio de Tulsa y dicté mi primera clase la semana siguiente.

La Universidad de Tulsa, TU ahora en más, es una universidad privada con finanzas medianamente grandes gracias al apoyo de la comunidad. Tulsa, OK, es una de las ciudades más ricas que yo conocí. Tulsa tiene un teatro enorme donde hay actividad artística todo el año y con su propia Sinfónica, durante la temporada, vienen las óperas que se presentaron ese año en Nueva York. En Tulsa había centros de investigación de Amoco y Continental, dos

de las empresas petroleras más grandes del mundo, aparte de los centrales de CITGO y las Williams Co. En ciudades próximas como Bartlesville, estaba Phillips y en Ponca City estaba CONOCO.

Como se imaginan el departamento más grande de TU es el de Ingeniería de Petróleo. Ingeniería Química es un departamento pequeño con unos siete profesores y un par de secretarías. Como muchos de los departamentos de ingeniería de EE.UU., compartíamos las clases de mecánica de fluidos, computación, etc., con las otras ingenierías del *College*. La conexión con los países petroleros era grande y todos los años venían un contingente de alumnos del cercano oriente, con todos los gastos pagos, inscriptos en las carre-



Esta es una vista de un monolito cerámico con celdas cuadradas. Este monolito es para una torre de pequeño diámetro. Los monolitos usados en automotores tienen generalmente una sección ovalada.

ras de ingeniería, geología y computación. Estos alumnos eran, generalmente mayores que los locales, con familias y muy dedicados a recibirse y volver a casa. Salvo excepciones, eran alumnos de pregrado sin intención de hacer un posgrado.

A mediados de 1987 tuvimos una reunión con personal del grupo de investigación de *Allied Signal* (desde ahora A-S) que tenía una planta en Catoosa cerca de Tulsa. En esa planta A-S fabricaba convertidores catalíticos para automóviles. Es digno de mencionar porque una empresa internacional buscó a los profesores de TU para interesarlos en colaborar con sus grupos de investigación asociados a esa planta industrial. Todo automotor en EE.UU. y en muchas partes del mundo tiene convertidores catalíticos y esta planta proveía a General Motors y Toyota, para varios de sus modelos. El jefe de este grupo era el Dr. Jerry Summers que fue uno de los investigadores que desarrollaron la idea y el proceso para hacer los convertidores. El convertidor, basado en un monolito cerámico que fabrica la empresa Corning, es como un panel de abejas con celdas cuadradas de 1 mm de lado. Hoy en día, expiradas las patentes se fabrican en muchos países. La forma y tamaño de estos monolitos varía, pero típicamente tiene la sección transversal de un óvalo con varios cientos de celdas en paralelo y un largo de entre 15 cm y 20 cm, como se muestra en la figura siguiente.

El monolito cerámico, en el proceso de A-S, se recubre primero con una suspensión (slurry) de alúmina (óxido de aluminio), se seca para conseguir una capa porosa sólida y en esta se embebe una solución que contiene el catalizador, típicamente de platino y rodio. El monolito en sí es poroso, pero de grano más compacto de modo que el catalizador se absorbe casi exclusivamente en la

capa de alúmina. Summers, uno de los tipos más "enfocados" que jamás conocí, buscaba ayuda en dos áreas, la formulación de catalizadores especialmente con la adición de bario y en el proceso de recubrimiento de los monolitos. Así fue el comienzo de una relación con A-S que con fondos de investigación muy generosos duró desde 1988 hasta 1998 cuando me fui de TU. Ese fue también el comienzo de mis muchos trabajos con los monolitos cerámicos que son una maravilla de ciencia e ingeniería, desde el proceso de fabricación hasta las innumerables distintas aplicaciones. Los problemas de investigación más interesantes provienen de problemas reales. La realidad es más interesante que la imaginación.

Ya con fondos para comprar equipos y mantener alumnos de posgrado, aun cuando a los 47 años ya había pasado mi época más productiva, volví a dedicarme con intensidad a la investigación. El proceso de recubrimiento de monolitos de A-S consiste en inundar el monolito con la suspensión de alúmina y luego con aire evacuar el centro dejando una capa del barro de la suspensión sobre las paredes internas del monolito. Este barro/suspensión es no-Newtoniano y sus propiedades dependen no solamente en el contenido de alúmina sino también de las sales que la acompañan. Problema número uno fue caracterizar la reología de estos barros, no solamente midiendo la variación de propiedades con el esfuerzo de corte, es decir la velocidad de deformación, sino también midiendo el potencial zeta de las suspensiones para cuantificar la dependencia de propiedades reológicas con las propiedades fisicoquímicas. Entraron a jugar todos los trucos que aprendimos estudiando los caolines argentinos. El uso de mediciones reológicas y de cargas de partículas en función

del pH fue importante para A-S porque les dio herramientas que les permitían hacer un control de calidad efectivo con sus proveedores de alúmina. Problema número dos fue aprender cómo se mueve una burbuja cilíndrica larga, el aire que está expulsando parte del barro, dentro de un capilar cuadrado lleno de suspensión/barro. Este problema tiene tres partes: 1) el barro pierde parte del agua al entrar en contacto con el monolito poroso y sus propiedades reológicas cambian, 2) la burbuja se mueve dentro del capilar y desplaza el barro. ¿Cuánto barro queda sobre las paredes del capilar? y 3) ¿cómo se mueve el líquido que quedó sobre las paredes antes del secado que convertirá el barro en un sólido?

Podría parecer que estos problemas de investigación eran muy teóricos para su aplicación en este proceso. Por suerte una de las condiciones de A-S es que yo podía hacer la investigación que se me ocurra con la condición de que nos diera información de cómo funciona el proceso y que si alguna vez A-S tenía problemas de producción, estaría al lado de los ingenieros de la planta tratando de resolverlo. Tampoco teníamos restricciones en publicar los resultados mientras no mostrara algún secreto de fabricación. Todos estos resultados están publicados en revistas de investigación. Recuerde, si no está publicado, no es ciencia. La primera parte de este problema tuvo un resultado muy predecible, podíamos demostrar cuales eran las condiciones óptimas de humedad en el monolito antes del proceso para balancear el contenido de sólido del barro de recubrimiento. La segunda parte tuvo un resultado predecible para alguien familiarizado con film líquido. La punta de la burbuja larga dentro del capilar lleno de líquido tiene, salvo la curvatura, la misma geometría que el movimiento del sólido que sale de un reservorio si

miramos este problema desde un sistema de coordenadas fijo con la punta de la burbuja. Por lo tanto, el espesor de la capa de barro que queda en la pared es función de la velocidad de la burbuja. La velocidad de la burbuja es función de la presión del aire que forma la burbuja con lo cual podemos afinar el espesor final de alúmina en el monolito. La tercera parte fue un problema aún más interesante ya que el capilar es cuadrado y la burbuja cilíndrica. Parte de las condiciones de contorno de este flujo están sobre una superficie que tiene una sección sólida cuadrada mientras que el resto está sobre una interfaz que tiene una sección circular. Suponiendo flujo lento no inercial, resolvimos este problema con una serie infinita que satisface la ecuación de Laplace. El truco consistió en usar un polinomio de Laplace donde el radio que necesitamos para el círculo se escribe en función de las coordenadas (x,y) que se necesitan para el contorno cuadrado. Esta es una solución elegante de modo que incluyo la cita del *paper* para el lector curioso (Kolb y Cerro, 1993). Blake Kolb (PhD Tulsa, Senior Scientist 3M), era y es un

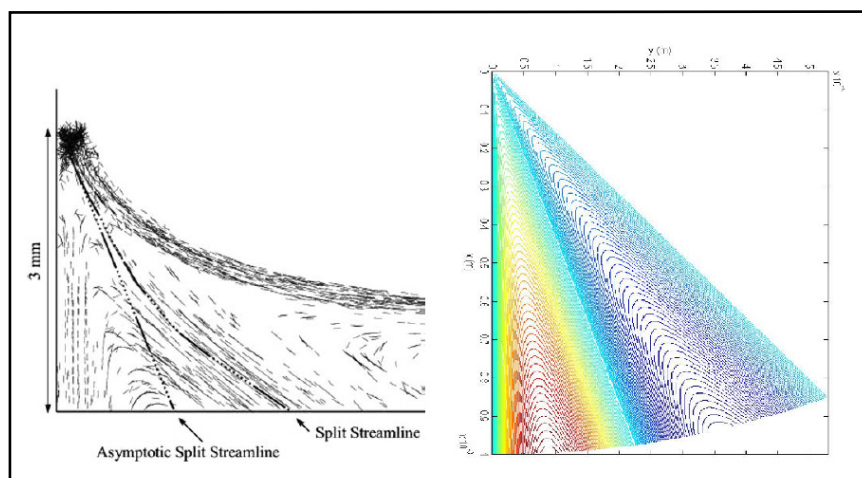
experimentalista excepcional. Blake diseñó y construyó nuestro sistema de visualización de flujos usando cine de alta velocidad que usamos en muchos otros trabajos experimentales. Para los interesados en el recubrimiento de monolitos, incluyo la referencia publicada en una revista de interés general (Kolb y col, 1993).

Blake diseñó también un experimento para visualizar el flujo en la región cercana a una línea de contacto dinámica, como se muestra en la figura.

Con este sistema, usando una lámina de luz de un láser, podíamos ver en movimiento las líneas de corriente en una región con una definición de 0,1 mm. La línea de contacto es el punto en dos dimensiones donde se juntan el sólido plano, la fase líquida y el aire que los rodea. Los primeros resultados eran controversiales porque eran muy diferentes a la teoría desarrollada por Huh y Scriven en 1962 que era hasta ese momento la más aceptada. La teoría de Huh y Scriven predice un *rolado* como si fuera una alfombra

que se desenrolla o enrolla sobre el piso mientras que los experimentos muestran una línea de corriente interna, que bautizamos como la línea de separación (*Split streamline*), que lleva líquido desde la línea de contacto hacia la fase líquida que invade la superficie sólida. Ver figura anterior. Los experimentos del primer *paper* los hizo Mariano Savelski un estudiante argentino que obtuvo un MS conmigo en 1995. Mariano (PhD Oklahoma, Rowan University). El director de Tesis de Mariano fue el Dr. Miguel Bagajewicz en Norman, Oklahoma. Bagajewicz (PhD Caltech, U of Oklahoma) fue uno de mis colaboradores durante el proyecto PMEAP. Estos experimentos fueron, años después, reforzados por otros experimentos más cuantitativos llevados a cabo por Javier Fuentes en Huntsville, AL. Estos experimentos son los primeros resultados experimentales publicados, tal vez los únicos, que describen el movimiento de líneas de contacto.

En 1991 se incorporó a mi grupo la Dra. Aura López de Ramos (PhD Tulsa, SENACYT Panamá). Aura era docente auxiliar en la Universidad Simón Bolívar de Venezuela y Víctor Ramos era un ingeniero que estaba subiendo por los rangos de PEDEVESA, la empresa de petróleo de Venezuela que compro CITGO. Con la conexión petrolera surgió también la idea de hacer algo relacionado. Un tema interesante era el problema de absorción de CO_2 en hidrocarburos que se usa en explotación secundaria de reservorios. La velocidad de absorción se mide introduciendo una gota de hidrocarburo en un capilar horizontal a distintas presiones y midiendo la velocidad de aumento del tamaño de la gota. El CO_2 se absorbe en el hidrocarburo y el tamaño de la gota aumenta en función del tiempo de contacto y de la presión y temperatura del sistema. Como ya teníamos capilares de sec-

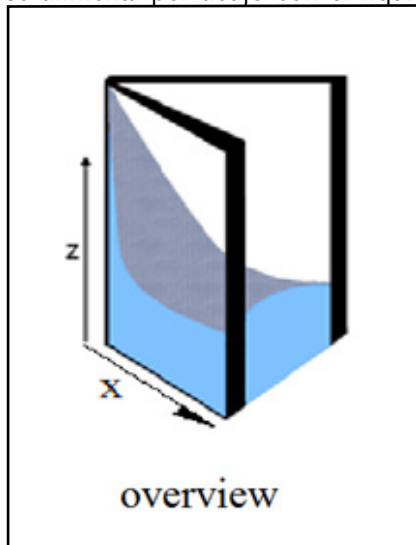


Vista de una sección del flujo en la vecindad de una línea de contacto dinámica. La foto está tomada con una cámara con iluminación de un láser. La figura de la derecha es una representación esquemática de las líneas de corriente del flujo.

ción cuadrada decidimos hacer el experimento con esos capilares ya que las paredes planas hacen mucho más fácil la visualización. Después de un par de días, Aura vino a mi oficina a reportar resultados extraños: el tamaño de la gota no aumentaba, sino que disminuía. Esto era inesperado, pero los experimentos nunca mienten. La respuesta de esta paradoja estaba en los capilares cuadrados y en un fenómeno reportado por primera vez por Brooke Taylor en 1712. Un filamento líquido formado por un ángulo de 90 grados y un líquido que moja, se mueve sin posibilidad de parar en las esquinas de un capilar de sección cuadrada en posición horizontal. Siguiendo la pista encontramos un *paper* sobre este fenómeno cuyos autores son un matemático de la Universidad de Stanford, R. Finn, y uno de sus estudiantes de posgrado, P. Concus. Estos analizaron el problema como una superficie cuya forma está regida por la ecuación de capilaridad de Laplace para un filamento líquido con ángulos de contacto prescripto entre el líquido y la superficie sólida. La conclusión es que no hay una solución posible para el tope del filamento si la suma del ángulo del capilar más el ángulo de contacto es menor o igual que 90 grados. Esta propiedad se usa en los tanques de la estación espacial ya que los ranuras canalizan el movimiento de fluidos dentro de un tanque aun cuando no hay gravedad. La diferencia entre la solución matemática y los experimentos es que los capilares de vidrio no tienen una esquina perfecta, sino que tienen una esquina redonda con un radio muy pequeño, del orden de micrones. Este resultado lo usamos en el diseño de un método para medir ángulos de contacto muy pequeños ya que hay una relación muy simple entre el radio de la esquina del capilar, la altura del filamento desde una piletta de líquido y el ángulo de contacto del líquido con el

sólido. Aura trabajó también en la medición de tensión superficial por el método de la gota usando esplines matemáticos para representar la curvatura de la gota y la propiedad de que la curvatura es una función lineal de la distancia al sólido. Aura volvió a Venezuela luego de su doctorado, pero ahora, debido a la situación política está exilada en Panamá.

Un colega en TU, el Dr. Martin Abraham, tenía también un contrato con A-S para analizar el efecto de bario y rodio en la eliminación de compuestos nocivos generados por la combustión en motores. Con Martin presentamos un proyecto a la *National Science Foundation*, NSF, para desarrollar reactores de dos fases basados en los monolitos cerámicos. El proyecto de cuatro años fue aprobado y así nació el reactor de espuma en monolito (*Monolith Froth Reactor*). Yo tenía la tecnología para recubrir monolitos, pero no teníamos datos de transferencia de materia y Abraham trabajaba con catalizadores de modo que pusimos a trabajar los dos temas en un reactor de hidrogenación. El reactor se alimenta por abajo con el líqui-



Representación esquemática de la elevación capilar de un líquido viscoso en un ángulo formado por paredes planas.

do que contiene los reactivos, se introduce también burbujas de gas y la mezcla sube como un tren de burbujas y líquido por las celdas del monolito y entra en contacto con el catalizador que está embebido en el recubrimiento de alúmina. El movimiento de una burbuja larga dentro de la celda capilar ya lo habíamos analizado, pero el tren de burbujas separadas por una sección de líquido era un problema diferente porque la parte posterior de la burbuja tiene una configuración distinta que afecta el mezclado y la transferencia de materia. El paso de la mezcla de gas-líquido está relacionado con la velocidad de reacción y la transferencia de materia de modo que hicimos también un estudio del tiempo de residencia de las dos fases. Lo que no podíamos explicar era como entran al capilar cuadrado las burbujas de gas que son más grandes (2 a 4 mm) que el capilar. Este trabajo lo hice con un alumno argentino, Martín de Tezanos Pinto que estaba haciendo un MS. Martín hizo luego un doctorado conmigo (PhD Tulsa, ¿?), pero en otro tema que mencionaré más adelante. Martín era el "jefe de taller" del grupo. Como los técnicos del taller del *College* a veces le regateaban el uso de las herramientas, me convenció que compráramos un torno para el laboratorio. El reactor fue usado con éxito para oxidar ácido acético, para la hidrogenación de ácidos grasos y finalmente para la producción de compuestos a partir de biomasa.

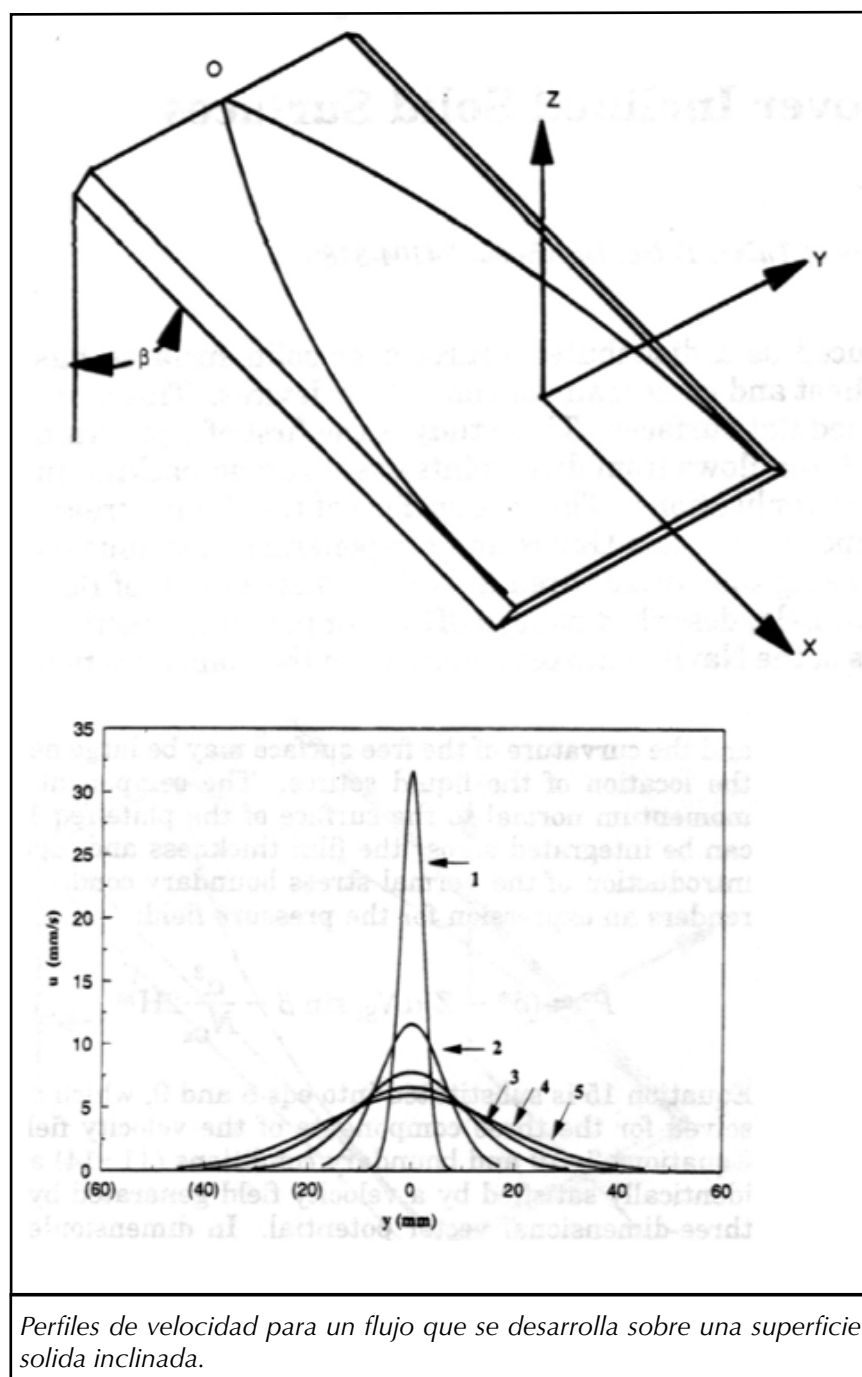
Mientras ejecutábamos el proyecto del monolito yo presente otro proyecto a NSF para estudiar el flujo de film líquidos sobre rellenos ordenados, *Experimental Characterization and Modeling of Gas and Liquid Flow on Ordered Packings*. Este proyecto fue aprobado y me dieron fondos por cuatro años para hacer experimentos y teoría. Mi objetivo era desarrollar métodos de diseño de

rellenos ordenados similares con los que había trabajado en la PMEAP. La primera parte de este trabajo fue experimental y en principio sin fondos externos. La hizo un estudiante chino, Dr. Liqiang Zhao (PhD Tulsa, ¿?). Este trabajo (Zhao y Cerro, 1992), es uno de los más citados ya que fue el primero o tal vez el único, en mostrar datos experimentales del flujo de un film líquido sobre una superficie corrugada. El Dr. Sanat Shetty, (PhD Tulsa, VP *Research Victory Energy*), prosiguió con estos experimentos y los extendió al flujo de una fuente puntual que se dispersa sobre una superficie inclinada lisa o corrugada, ver figura a continuación.

La solución teórica del flujo sobre la superficie lisa es tal vez lo más cercano a una solución analítica en tres dimensiones de un flujo con interfaces. Es posible que al haberlo publicado en una revista de ingeniería no haya sido descubierto por físicos y matemáticos. Incluyo la cita para que el lector curioso lo compruebe (Shetty y Cerro, 1995). La culminación de este trabajo fue una presentación oral en el simposio *Distillation-Adsorption* en Maastrich en 1997 y también publicado donde mostramos una *correlación* para el diseño de un relleno ordenado. Esta *correlación* es una solución teórica expresada en función de números adimensionales que se utiliza para calcular el número de Sherwood de transferencia de masa en función de otros números adimensionales. Lo más notable es que, en diferencia con correlaciones experimentales, no tiene ninguna constante ajustable. Es puramente teórica, describe muy bien los resultados experimentales y es crucial para entender las relaciones que surgen de una solución matemática. (Shetty y Cerro 1997). Nuevamente, a mi entender en esta área de trabajo, es la única *correlación* publicada, surgida de teoría, no de experimentos.

Allá por el año 1994 me visito el Ing. Hartman Mitchell, VP de la compañía Fintube, basada en Tulsa, que tenían un problema interesante relacionado con los tubos que usaban en sus intercambiadores de calor. El producto principal de Fintube era de equipos *recuperadores del calor* residual en el gas de las calderas. Estos equipos tenían tubos

con aletas en espiral. Las aletas son comunes para intercambio con gas en el exterior del tubo. Estas aletas eran muy especiales ya que tenían cortes que las hacían parecer como estrellas de bicicleta con láminas de unos 5 mm de ancho. La razón de los cortes era facilitar la fabricación de los tubos y hacerlos más livianos. Si bien estas aletas que tenían menor



Perfiles de velocidad para un flujo que se desarrolla sobre una superficie sólida inclinada.

superficie que las enteras, tenían eficiencia similar, no mayor ni menor, que las aletas tradicionales.

Comencé este proyecto con un contrato muy generoso que me permitió tomar dos estudiantes de posgrado más la compra de un velocímetro Laser-Doppler para medir velocidades en aire. Las aletas estaban pintadas con una solución de cristales que cambian de color según la temperatura. La mayoría de los experimentos los hizo Martín de Tezanos Pinto para su tesis de PhD, en una celda de acrílico de casi 1 m de largo y unos 40 x 40 cm de sección transversal con tubos de aleta cruzados y agua caliente por dentro. La respuesta al dilema fue interesante. Las aletas cortadas tienen menor superficie, pero el mayor efecto negativo es la falta de conducción por el metal de las aletas desde la parte trasera del tubo que está caliente hacia el frente que está frío. Pero el efecto positivo, que compensa los dos negativos es que la capa límite del aire que se mueve sobre la aleta, se desprende de la lámina metálica, pero se vuelve a formar sobre la laminilla siguiente. Este es un efecto importante porque la mayor transferencia de calor está, por supuesto, en las áreas donde la capa límite es más fina.

A principios de 1996 fui de sabático al Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Salamanca, España, por seis meses. Durante ese tiempo dicté el curso de mecánica de fluidos para los alumnos e inicié un programa de investigación con mi gran amigo el Dr. Miguel Ángel Galán, jefe del departamento. Salamanca es una ciudad espectacular y la Universidad es una de las más viejas del mundo. Aparte de la Universidad de Salamanca está la Universidad Pontificia que es muy conocida por sus programas humanísticos. Salamanca es una ciudad

de estudiantes y al mismo tiempo un centro turístico de manera que la actividad es constante. Miguel estaba interesado en hacer cromatografía de afinidad para la separación de materiales biológicos, especialmente proteínas. Con mi historia de cromatografía, monolitos y la experiencia de Miguel en afinidad surgió el monolito como fase activa para la separación de proteínas. Otro ejemplo de que la conjunción de campos de investigación genera cambios importantes, Pero esa historia ocurrió mayormente en Huntsville de modo que la voy a dejar para el próximo capítulo.

Luego de mi sabático, decidí que mi paso por TU se había terminado. Tres de mis jóvenes colegas en TU, entre ellos el Dr. Abraham, habían encontrado cargos en otras universidades y el ambiente del departamento cambió, de modo que decidí buscar nuevos horizontes. La Universidad de Alabama in Huntsville, UAH, estaba buscando un jefe de departamento y me presenté como candidato. Me hicieron una entrevista y di un seminario en UAH donde asistió, ¿casualidad?, el jefe de ingeniería de una planta en Huntsville, HSV, donde fabrican convertidores catalíticos sobre monolitos de Corning. La planta es de Engelhard, una empresa mundial de catálisis, y el proceso que usan es distinto que el de A-S pero con problemas similares. UAH me hizo una oferta y la acepté a principios de 1997. En agosto de 1997 me incorporé a UAH como profesor y *chairman* del Departamento de Ingeniería Química y Materiales.

■ THE UNIVERSITY OF ALABAMA IN HUNTSVILLE

Mis dos hijos varones ya habían dejado el nido y Ana estaba en su último año de escuela secundaria de modo que por casi un año estuve

solo en HSV mientras Frances vendía la casa de Tulsa y Ana terminaba sus estudios secundarios. Al finalizar el verano de 1998, Ana partió hacia Flagstaff, Arizona donde se incorporó a la *University of Northern Arizona* y Frances, en uno de los autos con un gato y un perro, y yo solo en otro auto, partimos hacia Alabama. UAH contrató dos camiones enormes para la mudanza. Uno de ellos llevó nuestros muebles y pertenencias mientras que el otro llevó los equipos de mi laboratorio que a esta altura incluía mesas ópticas especiales, un equipo de video de alta velocidad (10,000 fpm), un Laser-Doppler completo, un *Mechanical Spectrometer* para medir propiedades reológicas y una gran cantidad de material óptico, entre otras cosas. Este equipamiento fue transferido sin cargo, salvo por el flete a UAH. Esa es una tradición en EE.UU. ya que esos equipos fueron comprados con fondos de la NSF y de las empresas con las que tuve contratos.

Huntsville es un lugar muy pintoresco, en un valle rodeado por montañas, que comparte con el Redstone Arsenal. El arsenal, un predio gigantesco propiedad del ejército de EE.UU., es el lugar donde radicaron a von Braun y los 110 ingenieros y científicos alemanes que diseñaron los cohetes alemanes de la segunda guerra mundial. La mayoría de los cohetes que incorporó EE.UU. durante los años posteriores a la guerra fueron diseñados por ese grupo. A principios de los 60s, en plena carrera por el espacio, von Braun convenció al presidente Kennedy de que ellos podían poner un hombre en la Luna y HSV se convirtió en el primer hogar de NASA. La historia de esos años es también pintoresca porque la población de HSV se multiplicó varias veces entre 1963 y 1970 con los consabidos problemas de un crecimiento tan rápido. Las anécdotas de las pruebas de los cohetes que se

hacían en el arsenal y rompían las ventanas de la ciudad, son parte del folclore. La universidad, UAH, nació como consecuencia de la carrera espacial. Hoy HSV es la ciudad más grande de Alabama y entre NASA, el ejército y un parque de investigaciones asociado, hay unos 12.000 ingenieros y científicos en un radio de 40 km. En Huntsville está también el Centro Espacial de NASA (*Space and Rocket Center*) que es un museo donde, entre otras cosas, hay un *Space Shuttle* real con sus enormes tanques y un cohete Saturno también real, ver figura a continuación. También hay un Campamento Espacial donde vienen niños de todo el mundo a familiarizarse con viajes espaciales y el laboratorio espacial.

De Tulsa vino conmigo un postdoctoral de Salamanca, el Dr. Javier (*Javi*) Montes. Javi Montes recibió su doctorado en Salamanca bajo la dirección del Dr. Galán, midiendo y modelando transferencia de materia en reactores biológicos. Era natural que empezáramos nuestra colaboración estudiando la transferencia de oxígeno de las burbujas de aire hacia el líquido que contiene la reacción biológica. Los primeros experimentos los hicimos para mirar cómo se forman las burbujas desde un orificio y como suben por gravedad dentro de un recipiente lleno de líquido. Ver como sube una burbuja dentro de un líquido no parece muy interesante hasta que lo vemos en cámara lenta gracias al video de alta velocidad. Las oscilaciones de las burbujas no son aleatorias, sino que son descritas por la teoría con soluciones transitorias de la ecuación de Laplace y dependen del tamaño de la burbuja, es decir su diámetro equivalente si fuera esférica, de la velocidad con que sube, de la tensión interfacial y de la densidad y viscosidad del líquido. La concordancia entre los experimentos y la teoría es importante porque nos

permitió hacer un “mapa” del comportamiento de las burbujas con los parámetros y las propiedades mencionadas y de correlacionar el tipo de burbujas con la velocidad de transferencia de materia.

A fines de 1999 me visitó en HSV el Dr. Pierre Woehl de los laboratorios de investigación de Corning en Fontainebleau, Francia. Pierre era miembro de un grupo de Corning que estaba buscando nuevas apli-



Vista del cohete Saturno en el Space and Rocket Center de Huntsville.

caciones para los monolitos cerámicos y habían leído nuestros trabajos. Martin Abraham vino desde Toledo, OH, y estuvo también presente en esta reunión. Poco tiempo después ambos firmamos contratos de consultoría con Corning y esto me permitió visitar varias veces el laboratorio de Fontainebleau. Esta relación duro casi cuatro años y la mayoría de los temas eran propiedad de Corning de modo que muy poco se publicó, salvo una colaboración con Pierre que modela la pérdida de presión por el paso de un tren de burbujas por el monolito y, que yo sepa, es el único trabajo teórico/experimental publicado sobre este tema. Creo que es importante recalcar que los trabajos de consultoría de profesores con industrias no son solamente aceptados, sino que también incentivados por las universidades. Es una prerrogativa de los profesores dedicar hasta un 20% de su tiempo en consultoría con industrias. Por supuesto si la relación incluye un contrato de investigación en la universidad, como ya describí otros, la universidad se beneficia también económicamente.

También alrededor de fines del siglo XX, NSF me financió un proyecto para estudiar el proceso Langmuir-Blodgett para deposición de films mono-moleculares. El proceso L-B consiste en crear un film de un compuesto anfifílico sobre una superficie acuosa y depositarlo en movimientos sucesivos de entrada y salida sobre una superficie sólida. Es decir, un flujo de Landau-Levich pero con una membrana en la interfase gas-líquido. Es evidente que nuestros trabajos en Tulsa para caracterizar el movimiento de líneas de contacto de tres fases y el flujo de film líquido están estrechamente ligados al proceso L-B. Yo publique por mi cuenta un artículo (Cerro 2003) que relaciona nuestros experimentos de líneas de contacto con

el proceso L-B. La única mención anterior de esta relación como una conjetura, pero sin el beneficio de los experimentos, fue del Premio Nobel francés Pierre de Gennes.

El subsidio de NSF me permitió incorporar nuevos alumnos de posgrado y comprar el equipamiento específico para el método L-B. Uno de esos alumnos fue la Dra. María Elena Díaz Martín (PhD UAH, U. de Salamanca). Elena fue uno de los alumnos en mi clase de mecánica de fluidos en Salamanca. Los alumnos de Salamanca tienen una formación excelente en matemáticas y una práctica extensa en laboratorio. Elena, para completar, tiene una habilidad especial para manejar computadoras. El otro alumno fue el Dr. Javier Fuentes (PhD UAH, ¿?) de la Universidad Simón Bolívar de Venezuela. Javier también tenía una sólida formación académica y experiencia de laboratorio además de competir con Elena en la modelación por computadora. Javier tenía doble ciudadanía, una de ellas española y pasaporte de la Unión Europea, así que al terminar su PhD se radicó en Inglaterra.

Los experimentos y la modelación de Elena nos permitieron llenar el vacío hidrodinámico en la literatura de L-B. La deposición del film anfifílico se hace a baja velocidad para que se deposite un film seco, es decir sin agua entremetida. El límite de velocidad para la inmersión o emersión del sólido es función de fuerzas moleculares que determinan el ángulo de contacto y de fuerzas hidrodinámicas que determinan el ángulo de contacto dinámico. Este resultado fue un modelo confirmado experimentalmente y que permite depositar films a la mayor velocidad posible antes de la transición a un flujo Landau-Levich que acumula agua entre el sólido y la membrana. Aparte de una serie de publicacio-

nes el mayor contenido de la tesis doctoral de Elena Díaz se publicó en un libro (Díaz y Cerro, 2008) y en el capítulo de otro libro editado por Martín del Valle y Galán Serrano sobre un Simposio llevada a cabo en Salamanca en 2004.

El tema de Javier Fuentes fue cuantificar experimentalmente los modelos de flujo asociados a mojado y des-mojado en una línea de contacto de tres fases. La parte experimental confirma la forma del flujo e introduce medidas de velocidad de la línea de contacto y tamaño de la región activa. La confirmación y cuantificación de la presencia de líneas de corriente que dividen el campo de velocidad es de capital importancia, no solamente para recubrimientos sino para una variedad de fenómenos de interés teórico y práctico.

También en 2001 se unió al grupo de trabajo la Dra. Eva Martín del Valle (PhD Salamanca U. Salamanca), que hizo su doctorado bajo la dirección del Dr. Galán. La tesis de Eva fue en cromatografía de afinidad y su estadía en UAH fue dedicada a desarrollar un proceso de recubrimiento de monolíticos cerámicos con agarosa y luego la activación de la agarosa con sitios activos para usarlos como medio soporte en cromatografía. El modelo matemático y la confirmación experimental del uso de monolitos en cromatografía es uno de mis *papers* más citados (Martín del Valle y col, 2004). Me acuerdo del comentario de uno de los revisores del *paper*: "Este trabajo es tan importante como aburrido y difícil de leer". Es evidente que un modelo matemático no es común en una revista de biotecnología. Al año siguiente, con Eva y Javi Montes de vuelta en Salamanca y con Miguel Galán, publicamos una secuela que incluye la modelación del fenómeno de transferencia de la fase líquida a la sólida y viceversa.

También a principios de siglo comenzó una colaboración que duró muchos años y que fue muy prolífica con el Dr. Michael Savage, profesor del Departamento de Física de la Universidad de Leeds en Inglaterra. Conocía al Dr. Savage por haber compartido reuniones y cenas durante los simposios de la *International Society for Coating Science and Technology* (ISCST), pero realmente hicimos amistad cuando compartimos varios días invitados por la compañía 3M para dar un curso de la teoría hidrodinámica de recubrimiento a los ingenieros de la planta de 3M en Essen, Alemania. El Dr. Shuzo Fuchigami, VP de investigación de 3M nos invitó a los dos y al Dr. Wurtz de Alemania, experto en CFD. Mike es un matemático con una gran formación científica y humanística con quien es un placer conversar y ciertamente colaborar en investigación. El tema era, por supuesto, modelar el movimiento de la línea de contacto trifásica para explicar los resultados experimentales que no coincidían con la literatura existente. Este era y todavía es uno de los problemas más importantes y solo parcialmente resueltos de la HF.

En esta colaboración participó también la Dra. M. Elena Díaz, ya de vuelta en Salamanca. Lo primero que concluimos es que, para modelar las líneas de contacto y los ángulos de contacto dinámicos, debíamos entender los ángulos de contacto estáticos. Aunque pareciera una simplificación absurda, mucha de la literatura sobre ángulos de contacto comienza siempre con la ecuación de Young (*circa* 1805) que postula una relación geométrica entre las fuerzas interfaciales gas-líquido, gas-sólido y líquido-sólido. La única de estas "fuerzas" que está bien definida y se puede medir es la tensión interfacial gas-líquido de modo que no hay forma de demostrar validez. El ángulo de contacto

es la condición de contorno que se usa para resolver la ecuación de Laplace que modela, por ejemplo, la forma de una gota posada sobre una superficie sólida. El problema es que el ángulo de contacto está determinado por fuerzas moleculares que actúan en la región íntima de la línea de contacto y la ecuación de Laplace original no contiene fuerzas moleculares. Uno de los métodos para incluir estas fuerzas es usar la ecuación de Laplace *modificada*. Pero la ecuación modificada solo es válida en la región íntima de la línea de contacto. Con un método de perturbación podemos usar la ecuación modificada cerca de la línea de contacto y la ecuación de Laplace en el resto de la gota. Esta solución da una paradoja ya que el valor del ángulo de contacto estático que se mide experimentalmente es una proyección del perfil de la gota y no aparece en ningún lugar de la solución matemática (Díaz y col, 2010 a). La histéresis del ángulo de contacto estático, que complica las mediciones, se debe a que la línea de contacto se detiene en una posición que no es la de equilibrio. Este fenómeno se debe a la presencia de un film del líquido de dimensiones moleculares que coexiste, adsorbido en el sólido, con la gota macroscópica. Continuación de estos resultados fue el desarrollo de un método para predecir el ángulo de contacto en función de las fuerzas moleculares y otro más específico para describir el fenómeno de transiciones de mojado con la temperatura.

Sin embargo, el problema del movimiento de la línea de contacto se mantenía elusivo. Mike se cansó pero Elena y yo seguimos. El fruto fue una teoría donde demostramos como se mueve la línea de contacto cuando se retira el sólido en presencia de fuerzas moleculares (Cerro y Díaz, 2021). Este trabajo fue enviado para publicación el 30 de Julio,

aceptado el 21 de septiembre y publicado electrónicamente por *Physics of Fluids* el 1 de octubre, todos en 2021. Si bien el trabajo fue publicado rápidamente, es más sorprendente todavía que la primera cita de este trabajo apareció en un *paper* en diciembre de 2021. La única explicación que se me ocurre es que esa cita fue de uno de los revisores de nuestro *paper* y tuvo conocimiento de este, antes de que fuera publicado.

En 2010 tome un sabatico en INTEC con el Dr. Saita (PhD Minnesota, INTEC) que fue también alumno de Scriven. Con el grupo del Dr. Saita y la Dra. Giavedoni trabajamos en los efectos de fuerzas moleculares en el flujo Landau-Levich a muy baja velocidad de deposición. La vuelta a Santa Fe, con la cálida hospitalidad de mis anfitriones se completó con nuestra estadía en un departamento en el edificio de INGAR, que fuera construido en poco más de un año bajo la administración de ARCIEN, cuando yo era director de INGAR y presidente de ARCIEN.

La gran mayoría de mis clases dictadas en UAH fueron sobre Balance de Materia (un curso del segundo año de la carrera) Diseño de Equipos, Diseño de Plantas (ambos cursos del último año). La clase de Balance de Materia comenzó como una alternativa a la clase tradicional que se dicta en casi todas las universidades del mundo con muy poca rigurosidad científica. Este tema lo comenzamos con Whitaker y Higgins que tenían el mismo problema en UC Davis. Por casi 20 años desarrollamos una serie de apuntes que culminó en un libro publicado por la editorial CRC en 2023. Este libro de texto (Cerro y col, 2023) basa los balances en calculo vectorial y las reacciones químicas en calculo matricial.

.. regrets, I have a few... (4).

He tenido muchos alumnos de Master y PhD tanto en Tulsa como en Huntsville, He mencionado a algunos de ellos, pero no a todos. Si así lo hiciera esta Reseña sería mucho más larga. A los que no mencioné, mis sinceras disculpas. En 2017 me jubile a los 75, después de 21 años en UAH. Huntsville es el lugar donde más tiempo permanecí, ya llevo ahora casi 28 años. A pesar de ser un "santiagoño vago" me gusta permanecer activo de modo que seguí publicando y revisando *papers* para varios *journals* después de mi jubilación. Con Frances gran parte del tiempo lo pasamos viajando a la Argentina para visitar familia y amigos o dentro de los EE.UU. con Eduardo en California, Alejandro en Chicago y Ana en el estado de Washington, o a Europa, pero más que nada a España donde también tengo familia y amigos extraordinarios.

Si siguieron esta reseña hasta el final ya saben que mis trabajos estaban muy enfocados, monolitos, rellenos ordenados, flujos de film líquidos y algunas incursiones en otros temas, pero las aplicaciones son muy diversas. Una de las cosas que aprendí del "Chief" Amundson en Minnesota es que la investigación es una matriz, las columnas son las disciplinas científicas y las horizontales son las aplicaciones. Las disciplinas y los conceptos que se aprenden en una investigación se pueden usar para analizar un fenómeno similar en una aplicación diferente. Las colaboraciones científicas son importantes y valen el esfuerzo que se hace para mantenerlas a la distancia. Los desarrollos más interesantes surgen de la conjunción de disciplinas.

Cuando contemplo mi pasado hay algunas cosas de las que me



Esta es una foto de Frances y yo en 2017. Ya jubilado, el mejor pasatiempo es viajar.

arrepiento, no muchas, pero casi todas son de cosas que no hice. Pensar cual sería el presente si hubiera hecho algo diferente es estúpido y no se lo recomiendo a nadie. Lo que si tengo claro es que la "gloria" es efímera. De los muchos que contribuyeron tanto, pocos tienen memoria de ellos. No tengo ninguna duda de que mi "historia" también va a desaparecer rápidamente. Lo que queda, mientras me queda vida, son la familia, los amigos y los discípulos. Los hijos y los alumnos son el principal legado. Para los jóvenes que recién empiezan les transfiero el consejo que me dio un amigo: la vida nos presta los hijos por un tiempo corto, aprovechen ese tiempo para disfrutarlos. Para los que hicimos una carrera en academia los alumnos, tanto de pre como de posgrado, son los que llevan la posta. La satisfacción de un profesor es volver a encontrarse con sus discípulos y comprobar que nos reconocen como alguien que los ayudó a educarse y a desarrollar su potencial. El cariño de mi familia, la amistad de mis amigos y

el reconocimiento de mis discípulos lo justifica todo. Como decimos en Santiago:

“...que más se puede pedir?
Tener un campo en el cielo,
sembrando estrellas vivir” (5)

(1) De la **Chacarera Santiagueña**, de **Julio Argentino Jerez**.

(2) De la chacarera **Chakay Manta**, música de los hermanos **Abalos**, letra de **Victor Ledesma**

(3) De la canción **Los Inundados**, con música de **Ariel Ramirez** y letra de **Izaak Eizemberg**

(4) De la canción **A mi manera**, letra de **Paul Anka**, popularizada por **Frank Sinatra**.

(5) De la canción **Qué más se puede pedir** del autor **Peteco Carabajal**.

■ REFERENCIAS

- Cerro, R. L. (2003) *Moving Contact Lines and Langmuir-Blodgett Film Deposition*, Journal of Colloid and Interface Science **257**, 276-283
- Cerro, R. L. y Diaz, M. E. (2021) *A General Solution of Dewetting Flow with a Moving Contact Line*, Physics of Fluids 55, DOI: 10.1063/5.0065168
- Cerro, R. L.; Higgins, B. y Whitaker, S. (2023) *Material Balances for Chemical Reacting Systems*. Taylor and Francis Pubs. Boca Raton, Fl 2023. ISBN 978-1-032-25530-9
- Diaz, M. E. y Cerro, R. L. (2008) ***Physicochemistry and Hydrodynamics of Langmuir-Blodgett depositions***. VDM Verlag Dr. Muller. Berlin 2008. ISBN: 978-3-639-08874-8
- Diaz, M. E., Fuentes, J., Cerro, R. L. y Savage, M. D. (2010) *An analytical solution for a partially wetting puddle and the location of the static contact angle*, Journal of Colloid and Interface Science, **348**, 232-240.
- Kolb, W. B. y Cerro, R. L. (1993) "Film Flow in the Space between a Circular Bubble and a Square Tube", Journal of Colloid and Interface Science 159, 302-311
- Kolb, W. B.; Papadimitriou, A.; Cerro, R. L.; Leavitt, D. y Summers, J. (1993) *The Ins and Outs of Coating Monolithic Structures*, Chemical Engineering Progress Febrero, 61-67
- Martin del Valle, E.; Galan, M. A. y Cerro, R. L. (2003) *Use of Ceramic Monoliths as Stationary Phase in Affinity Chromatography*, Biotechnology Progress **20**, 921-927
- Montagna, J.; Leone, H.; Vechietti, A.; y Cerro, R. L. (1987) *A Process Simulation Linked to a DBMS. Part I: The Executive System*, Computers and Chemical Engineering **11**, 63-71
- Shetty, S. y Cerro, R. L. (1995) *Spreading of Liquid Point Sources over Inclined Solid Surfaces*, Industrial and Engineering Chemistry Research **34**, 4078-4086
- Shetty, S. y Cerro, R. L. (1997) *Fundamental Liquid Flow Correlations for the Computation of Design Parameters for Ordered Packings*, Industrial and Engineering Chemistry Research **36**, 771-783
- Zhao, L. y Cerro, R. L. (1992) *Experimental Characterization of Viscous Film Flows over Complex Surfaces*, International Journal of Multiphase Flows **18**, 495-516

■ NOTAS

- 1 Ver Reseña de Alberto Cassano en <https://aargentnapciencias.org/publicaciones/revista-resenas/resenas-tomo-1-no-1-2013/> [NdE]