



Investigación, vinculación y transferencia

2019 - AÑO 2

Editores:

Cristina Vázquez

Luis Fernández Luco

SUBSECRETARÍA
DE INVESTIGACIÓN,
Y DOCTORADO

Vázquez, Cristina

Seminario de investigación, vinculación y transferencia : año 2 / Cristina Vázquez ; compilado por Cristina Vázquez ; Luis Fernández Luco. - 1a ed adaptada. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Cristina Vázquez, 2019.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-987-86-1213-3

1. Transferencia Tecnológica. I. Fernández Luco, Luis, comp. II. Título.
CDD 607.3

ISBN 978-987-86-1213-3





Investigación, vinculación y transferencia

2019 - AÑO 2

Editores:

Cristina Vázquez

Luis Fernández Luco

Prólogo

Una Ciudad del conocimiento es, por definición, más inclusiva. Es que -al contar con una población con mayor capital educativo y cultural, y con actividades económicas demandantes de conocimiento- genera bienestar social y mejora la calidad del empleo y la empleabilidad. En nuestro caso, la Ciudad de Buenos Aires es la más poblada del país. Aquí habitan aproximadamente 3 millones de personas, y se suma una cantidad similar durante el día por aquellos que vienen a trabajar o estudiar.

Con el eje puesto en el capital humano, CABA es considerada como la número uno de América Latina para estudiar -ubicándose, incluso, por sobre ciudades como Beijing y San Francisco (Best Student Cities, 2019)-, razón por la que casi 500 mil estudiantes la eligen. Según el último censo -entre graduados, estudiantes e ingresantes- contamos con más de 110 mil alumnos³ en ciencias aplicadas, y un alentador porcentaje de población que decide emprender.

Además de ser un distrito clave para el sistema de I+D argentino, la Ciudad de Buenos Aires incrementa año a año su participación en la producción científica nacional. Dentro de este contexto, la Universidad de Buenos Aires es -sin duda- uno de los actores preponderantes: por su cantidad de investigadores de primer nivel y reconocidos internacionalmente que genera y por las premiaciones que reciben en diferentes países del mundo.

El desafío de hoy, no se encuentra solo en generar capacidades en I+D, sino en propiciar un entorno que logre la articulación interactiva entre los distintos actores del sistema -donde las demandas sociales, culturales y productivas encuentren soluciones de base científica y/o tecnológica-. Es ahí, donde la Universidad de Buenos Aires -y la Facultad de Ingeniería específicamente-, llevan ya un largo camino recorrido; y donde esta publicación agrega gran valor al ecosistema ¿cómo? con ejemplos de protección de los resultados obtenidos en un proceso de investigación y desarrollo, y de vinculación con otros sectores que puedan tomar la tecnología y acercarla al mercado o brindar soluciones a la ciudadanía.

La importancia de compartir buenas prácticas de vinculación y transferencia tecnológica radica en que, si bien cada proyecto de investigación tiene particularidades, comparte -sin lugar a dudas- similitudes con otros. Y, aún más sustancial, es que -al ser visibilizadas- estas prácticas puedan ser adoptadas por otras instituciones que compartan la misión de transformar el conocimiento generado dentro de laboratorios en beneficios para la sociedad.

Felicito y acompaño a la Facultad de Ingeniería en esta iniciativa con el deseo de que sean muchas más. Que juntos podamos avanzar en un proceso transformador con la investigación, vinculación y transferencia de ciencia y tecnología como motores para el crecimiento de nuestra Ciudad y país.

Lic. Clara De Hertelendy

Directora General de Ciencia y Tecnología

Subsecretaría de Planeamiento Educativo, Ciencia y Tecnología

Ministerio de Educación e Innovación

1 Ciudad de Buenos Aires (2010). En Buenos Aires Ciudad. <https://www.buenosaires.gob.ar/laciudad/ciudad>

2 Best Student Cities (2019). En QS Top Universities. https://www.topuniversities.com/city-rankings/2019?utm_source=website&utm_medium=blog

3 Dirección General de Estadística y Censos, Ministerio de Economía y Finanzas (2017). Anuario Estadístico. Buenos Aires, Argentina.

→ Estudiantes de carreras de pregrado y grado de universidades e institutos universitarios. Ciudad de Buenos Aires: 499.335 en 2016.

→ Estudiantes, nuevos inscriptos y egresados de carreras de pregrado y grado, de instituciones universitarias de gestión estatal y privada: 110.510 en 2016 de Ciencias Aplicadas.

Prefacio

La Argentina se apresta a celebrar en el 2020 los 150 años de formación de ingenieros e ingenieras en este país. La Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires ha puesto en marcha el Proyecto 150ING con el que pretendemos conmemorar todos estos años de investigación tanto en ciencias básicas como aplicadas que hicieron al desarrollo tecnológico de nuestro país y la realización de obras de todo tipo y en todas las especialidades enmarcadas en este caso por el aniversario de graduación del que reconocemos como el primer ingeniero argentino, Luis Augusto Huergo. Es para nosotros también un orgullo inmenso reconocer a nuestra primer ingeniera argentina y latinoamericana, Elisa Bachofen.

Este aniversario no nos podía encontrar de mejor manera que discutiendo y definiendo los contenidos, la enseñanza y las capacidades necesarias para los ingenieros del presente y del futuro en lo que hemos dado en llamar el Proyecto Plan 2020. En este Proyecto buscamos a partir de lo resuelto por el Consejo Directivo renovar nuestra oferta académica de grado y de posgrado a la par de discutir y proponer nuevos títulos. Existen tanto motivos de índole interno como el afianzamiento de una política institucional académica que garantice el perfil de nuestros egresados como motivos de índole externos como la actualización a nuevos conocimientos y capacidades que son ya hoy requeridos a nuestros egresados. El contexto en el que nos desempeñamos está marcado fuertemente y cada vez con mayor impacto por lo que se conoce como la cuarta revolución industrial. En esta, lo que reconocemos como las Ciencias Básicas afloran directamente en los desarrollos de estos tiempos, dejando a las tecnologías con altísima flexibilidad no solo en las especializaciones hoy conocidas sino cada vez más interconectadas entre ellas y con las mismas Ciencias Básicas.

Siendo una universidad y siendo la nuestra la Universidad de Buenos Aires, la investigación tanto básica como aplicada en nuestro ámbito de la ingeniería no podía estar de lado en estas discusiones académicas y la hemos incorporado en lo que hemos dado en llamar el Plan de Investigación 2020. En el intentamos discutir y definir una Política Institucional de Investigación que sirva para ordenar nuestros recursos de la mejor manera alineados con las tendencias tanto nacionales como internacionales y de esta manera obtener no solo más recursos sino mejores resultados. Intentamos también lograr la mejor de las interconexiones e interacciones, tal como lo estamos trabajando entre las distintas carreras, entre la investigación y la enseñanza. Considero a la enseñanza la primera transferencia que debe realizar el investigador docente universitario, es en las aulas donde debe dejar su bagaje aprendido y madurado gracias a su trabajo cotidiano tratando de mover la frontera del conocimiento humano.

Quiero felicitar a todos los doctorandos que han volcado en este libro sus desarrollos y conclusiones. Estos trabajos como lo realizado todos los días en sus investigaciones por parte de los docentes de mayor dedicación de nuestra Facultad de Ingeniería deben servir para resolver problemas prácticos planteados en nuestra sociedad, esta es la tarea del ingeniero e ingeniera, dominar y usar de la naturaleza en pos del desarrollo y bienestar de la sociedad. Los problemas prácticos a los que les quepa una solución científica tecnológica que resulten en un significativo impacto social positivo deberían ser nuestra prioridad de trabajo, trabajo que es financiado por un pueblo que en su gran mayoría no va a poder hacer uso de la educación que ofrecen las instituciones educativas en este caso de carácter universitario en nuestro país. Quiero además de felicitar, alentar a nuestros investigadores y

docentes a reforzar los vínculos con los estudiantes motivándolos al desarrollo de la aptitud y actitud por la investigación, algo que nos hemos planteado en el Proyecto Plan 2020 para que este aniversario nos encuentre más que nunca a toda la Comunidad de la FIUBA formando ingenieros e ingenieras.

Ing. Alejandro M. Martínez

Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires

La divulgación de las líneas de investigación facilita y promueve la vinculación con el medio y la consecuente transferencia hacia proyectos de desarrollo e innovación tecnológica. Por esta razón, la Subsecretaría de Investigación y Doctorado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (SSecID) organiza Seminarios bianuales de Vinculación y Transferencia (SeVyT)

Estos seminarios tienen como antecedente inmediato las Jornadas de Tesistas, que empleaban un lenguaje muy académico y específico. Los SeVyT proponen un cambio en el lenguaje, adaptándolo según el eventual receptor de acciones de transferencia e innovación.

Bajo este concepto, se organizó en 2016 el primer SeVyT, cuyos contenidos se compilaron y editaron en una publicación libre, electrónica, disponible en la página de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (FIUBA), en la solapa de Investigación.

En el año 2018, organizamos el segundo SeVyT, que tuvo la particularidad de realizarse en dos instituciones diferentes. Los temas vinculados con la administración eficiente de la energía, las energías no convencionales, el ambiente y la seguridad y riesgo en estructuras civiles, fueron de interés para el Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires (GCBA) y se expusieron en el Palacio Lezama (exCanale). Las temáticas restantes, que comprenden, entre otras, biomédica, electrónica, química, microfluidica, mecánica y nanomateriales se expusieron en la FIUBA, sede Paseo Colón.

Consecuentemente, la edición del libro que condensa el SeVyT 2018 (SeVyT año 2) se estructura en dos partes: la primera, contiene los trabajos expuestos en el GCBA, mientras que la segunda contiene los trabajos presentados en la FIUBA. Esta edición también es de libre acceso y está disponible en la solapa de Investigación de la página web de la FIUBA. Para obtener información complementaria, la comunicación directa con los autores es sencilla, porque en cada trabajo se consigna el nombre de los doctorandos, sus directores y los datos para su contacto.

En esta oportunidad otorgamos premios a los mejores trabajos en cada temática, que consistió en la ayuda económica para asistir a un Congreso de su especialidad durante el año 2019, con el objeto de la difusión del potencial FIUBA en ámbitos ajenos a la Ciudad de Buenos Aires.

Nuestro agradecimiento a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UBA (SECyT) por su apoyo y motivación en acciones de transferencia, a las autoridades de FIUBA por el compromiso continuo con esta iniciativa y la mención expresa a la Secretaría de Relaciones Institucionales que posibilitó la interacción oportuna con el Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires.

Esta actividad conjunta y la asistencia de los investigadores a eventos de índole nacional contribuyen a alcanzar uno de los objetivos trazados en la edición anterior, donde nos propusimos trascender hacia otros ámbitos.

Dra. Cristina Vázquez y Dr. Luis Fernández Luco
Secretaría de Investigación, Posgrado y Doctorado.
Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires

Ambiente

- 1** Tratamiento de efluentes líquidos con nuevas metodologías.
Hanela Sergio Daniel, Miró Eduardo Ernesto, Candal Roberto Jorge y Zanini Anibal.
 - 2** Remoción química in-situ de compuestos orgánicos en efluentes acuosos.
Russo Analia Verónica, Jacobo Silvia Elena y De Angelis Laura Elizabeth.
 - 3** Analizando relaciones entre el precio de los cultivos y la opinión en twitter.
Xavier Ignacio González.
-

Bioingeniería

- 4** Estudio de respuestas evocadas y conectividad cerebral durante la actividad cognitiva mediante registros intracraneales directos en humanos.
Hesse Rizzi Eugenia Fátima; Ibáñez Agustín y Lew Sergio.
 - 5** Reconocimiento de patrones en señales biomédicas: Una aplicación a la electrocardiografía.
Liberczuk Sergio Javier; Zanutto Silvano y Arini Pedro.
-

Electrónica

- 6** Estudio de técnicas de procesamiento para la clasificación de materiales dieléctricos.
Albert Raymundo José y Galarza Cecilia.
- 7** Tomografía de internet: medición de tráfico y su relación con la topología.
Carisimo Esteban y Alvarez-Hamelin José Ignacio.
- 8** Sistemas de control para plantas con retardos variables.
Cistac Griselda y Zanini Anibal.
- 9** Control tolerante a fallas en vehículos aéreos no tripulados.
Claudio Daniel Pose.
- 10** Estudio, análisis y desarrollo de algoritmos de consenso para redes de sensores inalámbricos.
Zacchigna Federico G., Lutenberg Ariel y Vargas Fabian.

Energía

- 11** Estudio de efectos de escala viscosos en estructuras hidráulicas mediante modelación numérica.
Badano Nicolás Diego y Menéndez Ángel Nicolás.
- 12** Estudio de propagación de ondas electromagnéticas en un medio poroso: Monitoreos electromagnéticos y complementación con monitoreos sísmicos.
Curcio Ana, Jacovkis Pablo y D' Onofrio Enrique.
- 13** Las redes eléctricas del futuro, ¿Ya están acá? (Impacto de la generación distribuida en la red de distribución de BT).
Alejandro Jurado.
- 14** Generación de energía eléctrica utilizando cursos de agua.
David Hernán Menéndez Arán y Ángel Nicolás Menéndez.
- 15** Aportes metodológicos para controlar la eficiencia energética desde el lado de la oferta y la penetración de fuentes primarias de energías renovables en sistemas de distribución eléctrica.
Pérez Eduardo Andrés, Gustavo Alejandro Schweickardt y Fernando Nicchi.

Flúidos

- 16** Dinámica de suspensiones concentradas sometidas a vibración mecánica.
Barba Maggi Diego Guillermo, Piva Marcelo, Boschan Alejandro, Martino Román.
- 17** Control de separación no estacionaria a partir de líneas de emisión.
Charó Gisela Daniela, Artana Guillermo y Sciamarella Denisse.
- 18** Optimización de mezclado caótico en dispositivos microfluídicos con control de flujo a lazo cerrado.
Furtado Paes Gabriel y Cabaleiro Juan Martín.

Nanomateriales

- 19** Modelado de los procesos de secado y atemperado del arroz IRGA 424.
Bertotto Mercedes, Goldschmit Marcela y Gastón Analía.
- 20** Estudio de la microestructura y sus propiedades de aleaciones nano-estructuradas base Al obtenidas por diferentes técnicas de solidificación rápida.
Pichipil M.

- 21** Heteroestructuras basadas en nanopartículas magnéticas.
Rivas Rojas Patricia, Tancredi Pablo, Moscoso Londoño Oscar, Socolovsky Leandro.
- 22** Memorias no-volátiles empleando vidrios calcogenuros.
Rocca Javier Alejandro, Fontana Marcelo, Golmar Federico y Ureña María Andrea.
- 23** Desarrollo de nanomateriales con conductividad mixta iónica- electrónica para aplicaciones electrocatalíticas.
Suarez Anzorena María del Rosario, Walsöe de Reca Noemí E. y Larrondo Susana A.
- 24** Modificación organocatalítica de almidón para la obtención sostenible de derivados de alto valor agregado.
Tupa Valencia Maribel Victoria, Foresti María Laura y Herrera María Lidia.
-

Vivienda

- 25** Blindaje de ondas electromagnéticas en materiales no convencionales.
Boggi Silvina y Fano Walter G.
- 26** Análisis de hormigón estructural mediante modelos de bielas y tensores no lineales.
Vaquero Sebastián F. y Bertero Raul D.

1

Tratamiento de efluentes líquidos con nuevas metodologías

Hanela Sergio Daniel^{1,2}, Miró Eduardo Ernesto^{3,4},
Candal Roberto Jorge^{3,5}, Zanini Anibal^{1,6}

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

² Programa de Tecnologías de Tratamiento, Centro de Tecnología del Uso del Agua, Instituto Nacional del Agua

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

⁴ Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral

⁵ Instituto de Investigación en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de San Martín

⁶ Instituto de Tecnologías del Hidrógeno y Energías Sostenibles

Los procesos industriales, a menudo generan efluentes líquidos como corrientes residuales de las distintas operaciones que tienen lugar en los establecimientos. Estos efluentes, pueden ser volcados directamente a los cuerpos de agua, tales como ríos, lagos, arroyos, o bien ser colectados mediante redes cloacales que los transportan de forma centralizada, junto a los efluentes domiciliarios de la zona hasta los puntos de descarga al ambiente, pudiendo atravesar previamente por plantas depuradoras de líquidos cloacales. En nuestro país, se estima que el 58% de la población urbana está servida por redes cloacales pero se estima que solo reciben tratamiento entre el 15 y el 20% de las mismas previamente a su descarga al ambiente. [1]

Tanto para el vertido a cuerpos de agua como a redes cloacales, las industrias deben cumplimentar ciertas condiciones respecto a la composición de los líquidos vertidos. Dado el carácter federal de nuestro país, no existe una única norma a nivel nacional que regule los límites de vuelco, sino que cada jurisdicción cuenta con normativa propia, cuyos requerimientos pueden presentar ciertas diferencias entre sí. [2] Los objetivos generales de estas limitaciones residen en procurar la protección del ambiente y la calidad de los cuerpos de agua, al regular y controlar efluentes vertidos directamente al ambiente. En el caso de los líquidos vertidos a la red cloacal, el control de los líquidos recibidos en la misma persigue proteger las instalaciones y equipamiento de la red cloacal, evitar problemas operativos y garantizar que los líquidos efluentes de las plantas depuradoras cumplimenten los estándares de vertido exigidos a las entidades encargadas de la prestación del servicio de recolección, transporte y tratamiento de líquidos cloacales. Dado que los mencionados sistemas se encuentran diseñados para tratar efluentes cloacales de tipo doméstico, las normas suelen exigir que todo vertido de origen industrial que resulte vertido en las mencionadas redes, posea características similares a los primeros. En caso de que un efluente industrial presente composiciones diferentes a las esperables en un líquido cloacal convencional, podrían ocasionarse problemas operativos en los sistemas mencionados o

bien podría ocurrir que los componentes no sean adecuadamente removidos por los sistemas de tratamiento. Con los fines mencionados, existen organismos de control con la potestad de inspeccionar las descargas industriales, ya sea que estas sean vertidas al ambiente en forma directa o en forma indirecta a través de una red cloacal con los sistemas de depuración correspondientes.

Cada industria debe encargarse de adecuar la composición de los líquidos residuales hasta los límites de vuelco permitidos por las normativas vigentes. Para ello, las empresas deben instalar y operar procesos de tratamiento de efluentes. Estos procesos tienen como objetivo, remover todos los compuestos que pudieran estar presentes en los efluentes industriales en cantidades que excedan los valores requeridos para el vertido. Para el tratamiento de efluentes, la mayoría de las industrias emplean sistemas convencionales, tales como procesos físico-químicos, principalmente de coagulación-floculación y sistemas de oxidación biológica, generalmente de barros activados. [3, 4, 5] Estas alternativas pueden variar ligeramente para ciertos efluentes específicos como, por ejemplo, el uso oxidación química con hipoclorito de sodio para efluentes con cianuro, cuyo caso se presentó detalladamente en un trabajo previo. [6]

El constante incremento de la presión normativa, las crecientes exigencias ambientales de los mercados y las valiosas iniciativas de reutilizar líquidos tratados en las industrias, introducen progresivamente la necesidad de incrementar los niveles de remoción de contaminantes. [7, 8, 9, 10] El avance tecnológico conlleva un continuo desarrollo de nuevos compuestos que, de no tratarse adecuadamente, impactarán sobre el medio ambiente y las fuentes de agua potable. [11, 12, 13, 14] En muchas ocasiones los procesos de tratamiento convencionales resultan insuficientes para lograr los niveles de remoción requeridos. [8, 12, 15, 16, 17, 18, 19]

Para ciertos efluentes, los procesos convencionales de adsorción o de coagulación-floculación a menudo presentan bajas eficiencias de remoción, además de operar en condiciones selectivas y no eliminar el contaminante sino limitarse solo a separarlo como un residuo sólido que luego deberá tratarse o disponerse. [17, 20, 21, 22] Los tratamientos biológicos exhiben serias limitaciones ante la presencia de compuestos recalcitrantes, tóxicos, o cuyos metabolitos cumplan alguna de las condiciones anteriores. [7, 23] También suelen requerir bastante espacio, generan lodos y son sensibles a variaciones en el caudal y la composición del líquido a tratar. [4]

En Argentina, cerca del 80% de las industrias se concentran en los principales núcleos urbanos. [24] El Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) concentra el 47.6% de los establecimientos industriales del país, correspondiendo el 94.4% de los mismos a empresas Medianas, Pequeñas o Microempresas (PyMEs). [25] Es en parte del AMBA, que se ubica la zona con mayor desarrollo urbano e industrial de la Cuenca Matanza-Riachuelo, fuertemente impactada por descargas de efluentes domésticos e industriales. [26] La Autoridad de dicha cuenca (ACUMAR) registraba entre 2011 y 2013, un total de 11.659 industrias manufactureras declaradas en su territorio. [22] Del total de descargas analizadas por ACUMAR entre Agosto de 2011 y Mayo de 2013, aproximadamente la mitad se encontraba fuera de los límites permitidos, habiéndose efectivizado ya más de 1.000 clausuras [22] y existiendo 1.234 establecimientos (industriales o no) que fueron declarados como Agentes Contaminantes corriendo riesgo de clausura en caso de no regularizar su situación. Ya en Junio de 2018, la ACUMAR reportaba un total de 844 establecimientos declarados como "Agentes Contaminantes" [28] encontrándose 290 de ellos, situados en el territorio de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Como dato complementario, el 39% de los establecimientos inspeccionados en el año 2016 por la empresa prestadora del servicio cloacal en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AySA) se encontraron en incumplimiento de las condiciones de vertido [29]. Los datos mencionados, reflejan que la problemática del tratamiento de líquidos residuales de origen industrial, aún no es un tema resuelto para las

industrias en una de las regiones con mayores densidades de establecimientos productivos del país.

Existen, a nivel mundial, alternativas superadoras de los sistemas de tratamiento convencional, que superan algunas de las limitaciones previamente mencionadas. Posiblemente, la implementación de estos sistemas en aquellos casos donde los sistemas convencionales no otorguen resultados satisfactorios, podría resultar una herramienta de suma utilidad para alcanzar los objetivos requeridos.

Las Tecnologías Avanzadas de Oxidación (TAOs) surgen como una alternativa prometedora para la depuración de efluentes difíciles de tratar por los métodos tradicionales. [10, 19, 23, 30, 31] Estas se basan en la generación in-situ de radicales hidroxilo (OH^*), cuyo potencial de oxidación es superior al de otros oxidantes como el ozono o incluso el oxígeno atómico. [32] Los hidroxilos tienen una muy baja selectividad y el potencial para atacar virtualmente todos los compuestos orgánicos. [8] Consecuentemente, las TAOs son especialmente aptas para la degradación de compuestos difíciles de oxidar por otros métodos. Como estas técnicas generan oxidantes muy fuertes, permiten lograr elevadas velocidades de degradación, dando lugar a sistemas compactos que constituyen una alternativa muy atractiva en plantas con poco espacio disponible, como muchas de las PyMES ubicadas en el AMBA. [3]

Entre las ventajas de las TAOs, cabe resaltar que son:

- Capaces de oxidar prácticamente cualquier compuesto orgánico
- Útiles para contaminantes tóxicos o refractarios
- Útiles para concentraciones elevadas
- Generalmente no producen barros
- Presentan cinéticas muy rápidas (dando lugar a unidades más compactas)
- No requieren agregado continuo de reactivos (algunas TAOs)
- Los oxidantes se descomponen rápidamente sin agregar componentes residuales no deseados (como el cloro, que origina órgano-clorados)
- Permiten alcanzar concentraciones muy bajas (p.e. productos farmacéuticos en efluentes cloacales, hormonas, trazas de agroquímicos)

Entre las limitaciones de las TAOs, puede mencionarse que, en general:

- Suelen ser más caras que los métodos convencionales (por eso se aplican cuando los tratamientos convencionales no son efectivos)
- Su eficiencia depende de diversos factores (composición del líquido, pH, aniones, penetración de luz, etc.)
- Requieren mayor trabajo previo (ensayos) para hallar la técnica y condiciones óptimas
- Cada tecnología específica presenta algunas limitaciones intrínsecas
- Aún tienen escasa difusión y desarrollo comercial en la región

Puntualmente, las TAOs relacionados al uso de ozono, con los que se está desarrollando la presente tesis, exhiben además de las enumeradas previamente, las siguientes ventajas específicas:

- ✓ El oxidante (ozono) se genera in-situ a partir del oxígeno del aire
- No se manipulan ni almacenan líquidos o sólidos
- No se depende de proveedores externos

- ✓ No se incrementa el volumen líquido ni se generan lodos
- ✓ No se agregan sustancias que deban separarse luego
- ✓ El ozono residual se descompone en compuestos inocuos
- ✓ Es bastante simple en cuanto a su operación

Si bien, existe una enorme diversidad de TAOs que han demostrado ser eficaces para la destrucción de diversos contaminantes [10, 11, 32, 33, 34, 35], solo algunas se encuentran disponibles a escala comercial [19, 36] y aún están poco difundidas, resultando prácticamente inexistentes a escala industrial en los países de economías emergentes como los de América Latina [8, 15] y particularmente en Argentina. [3] Cabe mencionar que se adiciona el hecho de que en áreas urbanas, muchos de los establecimientos industriales corresponden a Pequeñas y Medianas Empresas (PyMES) que habitualmente tienen aún más restringido el acceso a soluciones tecnológicas de punta y desarrollos a medida.

Por las ventajas mencionadas previamente, las TAOs basadas en ozono podrían constituirse en una herramienta de suma utilidad para resolver la problemática de muchas industrias ubicadas en zonas urbanas, que disponen de poco espacio y requieren soluciones tecnológicas alternativas a las convencionales para adecuar sus vertidos a las exigencias normativas.

Se identificaron tres barreras que dificultan la implementación de estas tecnologías en el mercado local:

- Dificultad para asegurar el cumplimiento de los límites de vertido ante fluctuaciones considerables en el caudal y composición del líquido a tratar,
- Identificación de estas tecnologías como costosas debido a su elevado consumo energético y
- Dificultad para analizar la factibilidad técnico-económica para cada caso particular mediante procedimientos que impliquen un número reducido de ensayos

Mediante el presente trabajo se están desarrollando herramientas de control automático que contribuyan a superar las barreras mencionadas para la aplicación de TAOs que emplean ozono en las industrias locales: Lograr una operación que reduzca costos operativos; responder satisfactoriamente ante cambios en los líquidos a tratar y reducir la cantidad de ensayos piloto requeridos previamente a su aplicación. Para ello se propone el uso de sistemas de control automático que permitan determinar rápidamente las condiciones de operación óptimas para cada caso, y ajustarlas automáticamente cuando las características de los líquidos se modifiquen. De esta forma, se podrán reducir costos operativos, lograr las condiciones de funcionamiento óptimas para cada caso y mejorar las eficiencias de tratamiento.

Bibliografía

- 1 - Plan Nacional de Agua Potable y Saneamiento, Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación – Julio de 2017
- 2 - Sistematización de la normativa argentina relacionada con el control de la contaminación hídrica, aplicable a establecimientos industriales y comerciales - Sergio D. Hanela, Alicia Duek, Damiano Tagliavini, Carlos E. Gómez, Marisol Reale, Yesica Russian, Eduardo A. Comellas, Marcelo B. Salinas – 3er Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, 2016

- 3 – Relevamiento personal del autor
- 4 – T. Yonar – Advances in Treating Textile Effluent, Chap. 1 Decolorisation of Textile Dyeing Effluents Using Advanced Oxidation Processes, Edited by Peter J. Hauser, Intech, 2011
- 5 – T.Y. Chen, C.M. Kao, A. Hong, C.E. Lin, S.H. Liang – Application of ozone on the decolorization of reactive dyes — Orange-13 and Blue-19, Desalination 249, (2009) 1238–1242
- 6 – S. Hanela – Estudio de la tratabilidad de efluentes con complejos ferrocianurados de elevada estabilidad empleando UV-ozono, Directores: J. Durán, S. Jacobo - Tesis de grado de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería (UBA), 2009
- 7 – L. Metcalf, H.P. Eddy rev. by G. Tchobanoglous, F. L. Burton, H. D. Stensel - Wastewater engineering : treatment, disposal, and reuse. 4th ed. McGraw-Hill, 2004
- 8 – X. Domènech, W.F. Jardim y M.I. Litter – Eliminación de Contaminantes por fotocátalisis heterogénea, Cap I, Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes – Ed.M.A.Blesa – Red CYTED VIII-G, 2001
- 9 – I. Arslan Alaton, I. Akmehmet Balcioglu, D. W. Bahnemann – Advanced oxidation of a reactive dye bath effluent: comparison of O₃, H₂O₂/UV-C and TiO₂/UV-A processes, Water Research 36, (2002), 1143-1154
- 10 – M. Pera-Titus, V. García-Molina, M.A. Baños, J. Giménez, S. Esplugas – Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review, Applied Catalysis B: Environmental 47 (2004) 219–256
- 11 – L. Feng, E.D. van Hullebusch, M.A. Rodrigo, G. Esposito, M.A. Oturan – Removal of residual anti-inflammatory and analgesic pharmaceuticals from aqueous systems by electrochemical advanced oxidation processes. A review, Chemical Engineering Journal 228 (2013) 944–964
- 12 – P. R.Gogate, A.B.Pandit – A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions, Advances in Environmental Research 8 (2004) 501-551
- 13 – T. Deblondea, C. Cossu-Leguilleb, P. Hartemanna – Emerging pollutants in wastewater: A review of the literature, International Journal of Hygiene and Environmental Health 214 (2011) 442– 448
- 14 – M. Umar, F. Roddick, L. Fan, H. Abdul Aziz – Application of ozone for the removal of bisphenol A from water and wastewater – A review, Chemosphere 90 (2013) 2197–2207
- 15 – Y. Anjaneyulu, N. Sreedhara Chary, D. Samuel Suman Raj, Decolourization of industrial effluents - available methods and emerging technologies - a review, Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 4 (2005) 245-273
- 16 – H. D. Mansilla, C. Lizama, A. Gutarra, J. Rodríguez – Texto colectivo: Eliminación de Contaminantes por fotocátalisis heterogénea , Cap XIII, Tratamiento de residuos líquidos de la industria de celulosa y textil – Ed.M.A.Blesa – Red CYTED VIII-G, 2001
- 17 – P. A. Gallerani, J. Lord, K. Klink, D. Ferguson - Managing Cyanide in Metal Finishing (EPA 625/R-99/009)- U.S. EPA - Office of Research and Development National Risk Management Research Laboratory Technology Transfer and Support Division, 2000
- 18 – D.Dzombak, R.Ghosh & G.Wong-Chong – “Cyanide in water and soil – Chemistry, Risk and Management” - CRC press, Taylor & Francis Group, 2006
- 19 – M.I. Litter, N. Quici – Photochemical Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment, Recent Patents on Engineering 4 (2010) 217-241
- 20 – C. Zaharia, D. Suteu – Textile Organic Dyes - Characteristics, Polluting Effects and Separation/Elimination Procedures from Industrial Effluents – A Critical Overview, Organic Pollutants Ten Years After the Stockholm Convention, Environmental and Analytical Update, Dr. Tomasz Puzyn (Ed.), Intech, 2012
- 21 – Z. Wang, M. Xue, K. Huang, Z. Liu – Advances in Treating Textile Effluent, Chap. 5 Textile Dyeing Wastewater Treatment, Edited by Peter J. Hauser, Intech, 2011

- 22 – J.W. Lee, S.P. Choi, R. Thiruvengkatachari, W.G. Shim b, H. Moon – Evaluation of the performance of adsorption and coagulation processes for the maximum removal of reactive dyes, *Dyes and Pigments* 69 (2006) 196-203
- 23 – I. Oller, S. Malato, J.A. Sánchez-Pérez – Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination - A review, *Science of the Total Environment* 409 (2011) 4141-4166
- 24 – M. Chidiak – Demanda y oferta de bienes y servicios ambientales por parte de la pyme: el caso argentino”, *Serie Medio ambiente y desarrollo*, N° 77, CEPAL, 2003
- 25 – Elaboración propia a partir de los datos correspondientes al año 2011, publicados por el Centro de Estudios para la Producción del Ministerio de Industria
- 26 – Plan Integral de Sanamiento Ambiental de la Cuenca Matanza Riachuelo, Autoridad de la Cuenca Matanza-Riachuelo, actualización Marzo de 2010
- 27 - Base de datos SICOI - ACUMAR, consultada al 31/05/2013, publicada en sitio web de ACUMAR
- 28 – Listado de agentes contaminantes publicados en sitio web de ACUMAR, 28/10/2018
- 29 - Informe anual del año 2017 – Gerencia de Benchmarking – Ente Regulador de Agua y Saneamiento (ERAS)
- 30 – Falah Hassan Hussein – Advances in Treating Textile Effluent, Chap. 6 Photochemical Treatments of Textile Industries Wastewater, Edited by Peter J. Hauser, Intech, 2011
- 31 – A. L. N. Mota, L. F. Albuquerque, L. T. C. Beltrame, O. Chivovone-Filho, A. Machulek Jr., C. A. O. Nascimento – Advanced Oxidation Processes and their application in the petroleum industry: a Review, *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, 2, (2008) 122-142
- 32 – O. Legrini, E. Oliveros, and A. M. Braun – Photochemical Processes for Water Treatment, *Chemical Reviews*, 93, (1993) 671-698
- 33 – K. Ayoub, E. D. van Hullebusch, M. Cassir, A. Bermond – Application of advanced oxidation processes for TNT removal: A review, *Journal of Hazardous Materials*, 178 (2010) 10-28
- 34 – A. Heponiemi, U. Lassi – Advanced Oxidation Processes in Food Industry Wastewater Treatment – A Review Food Industrial Processes - Methods and Equipment, ed. by Benjamin Valdez, Intech, 2012
- 35 – K. Ikehata, N. Jodeiri Naghashkar, M. Gamal El-Din – Degradation of Aqueous Pharmaceuticals by Ozonation and Advanced Oxidation Processes: A Review, *Ozone: Science and Engineering*, 28 (2006) 353–414
- 36 – W. Gernjak, M. Fuerhacker, P. Fernández-Ibañez, J. Blanco, S. Malato – Solar photo-Fenton treatment - Process parameters and process control, *Applied Catalysis B: Environmental* 64 (2006) 121-130

2

Remoción química in-situ de compuestos orgánicos en efluentes acuosos

Russo Analia Verónica^a, Jacobo Silvia Elena^a
y De Angelis Laura Elizabeth^b

^a *División Química de Materiales Magnéticos de Aplicación a la Ingeniería (DiQuiMMAI)
Facultad de Ingeniería UBA INTECIN-CONICET*

^b *Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA), Argentina*

Resumen

Los efluentes acuosos provenientes de gran variedad de industrias químicas y petroquímicas contienen compuestos orgánicos, tales como alcoholes, fenoles, bencenos, aminas, éteres y aromáticos clorados, en distintas combinaciones y concentraciones. Estos son en general tóxicos y peligrosos tanto para su descarga directa al medio ambiente como para su almacenamiento. Por tal motivo es fundamental contar con algún tratamiento químico que transforme los contaminantes en compuestos inocuos o debajo de las concentraciones máximas permitidas tanto para la salud humana como para el medio ambiente.

Actualmente, se están desarrollando nuevas tecnologías in-situ, como las barreras reactivas permeables (BRP) que consisten en interponer un medio reactivo semipermeable en el camino del flujo de una pluma del contaminante. Las BRP presentan numerosas ventajas y para su desarrollo es necesario explorar nuevos métodos de remoción. Esta propuesta de trabajo consiste en aplicar, a los efluentes acuosos, el método avanzado de oxidación conocido como "Método Fenton-like modificado".

Si bien esta metodología puede usarse en napas subterráneas en barreras reactivas permeables donde los procesos son lentos y auto-sostenibles aplicables a lugares extensos y despoblados, el proceso sugerido puede aplicarse en otros entornos más transferibles a la vida cotidiana, como por ejemplo tambores con aguas provenientes de sistemas de lavado de tanques de almacenamiento de naftas en estaciones de servicio, cuyas aguas no cumplan la reglamentación para ser descartadas como efluentes cloacales, o también en tanques de almacenamiento de residuos de industria farmacéutica/cosmética que por ejemplo contengan soluciones acuosas con colorantes que no puedan ser descartados como aguas cloacales.

Entre las ventajas de este Método se remarca que el reactivo usado (peróxido de hidrógeno) y el catalizador (hierro soportado en una zeolita) tienen bajo costo comercial; que puede aplicarse a procesos discontinuos; y que los productos finales del proceso no generan sustancias ajenas y perjudiciales al medio.

En el presente trabajo se analizan las capacidades de adsorción del catalizador soportado y la capacidad de remoción del Método, en sistemas estáticos y dinámicos, para ser escalados a sistemas reales de aplicación.

Palabras claves: remediación ambiental; zeolita; Fenton; Adsorción; catálisis heterogénea.

Introducción

Los efluentes acuosos provenientes de gran variedad de industrias químicas, petroquímicas y farmacéuticas contienen compuestos orgánicos, tales como alcoholes, fenoles, bencenos, aminas, éteres y aromáticos clorados, en distintas combinaciones y concentraciones. Estos son en general tóxicos y peligrosos tanto para su descarga directa al medio ambiente como para su almacenamiento. Por tal motivo es fundamental contar con algún tratamiento químico que transforme los contaminantes en compuestos inocuos o concentraciones aceptables con respecto a las máximas permitidas tanto para la salud humana como para el medio ambiente (Georgi et al., 2016). A principios de la década de los 60 empezó a tomarse en consideración el efecto que tenía la actividad humana sobre el medioambiente (Shyh-Fang Kang et al., 2002). Este contexto invitó a la discusión acerca de qué tipo de desarrollo podría favorecer el crecimiento económico, a la vez que favorecer el desarrollo social manteniendo un balance equilibrado con la naturaleza. Así, la idea de sustentabilidad ha tomado más relevancia y ha adquirido una gran importancia convirtiéndose en referencia de las actuales y futuras políticas en materia ambiental y económica (Kang y Hua, 2005). Es por ello que en los años 90, la preocupación por las cuestiones medioambientales ha originado todo un enfoque que tiene por objetivo prevenir o minimizar la contaminación desde su origen, tanto a escala industrial como en los laboratorios de investigación. Las tecnologías convencionales para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas, como el bombeo y su tratamiento posterior, tienen grandes inconvenientes debido a su elevado costo, necesidad y mantenimiento de equipos en el lugar de instalación, especialmente cuando se trata de períodos prolongados para alcanzar las concentraciones de contaminantes permitidos.

Debido a esta problemática, se están desarrollando nuevas tecnologías in-situ, como las barreras reactivas permeables (Chen et al., 2011; Vignola et al., 2011; Si-Hyun Do et al., 2011), que presentan ventajas sobre otros métodos y consisten en interponer un medio reactivo semipermeable en el camino del flujo de una pluma del contaminante y para ello se necesita implementar nuevos métodos de remoción. Los procesos avanzados de oxidación (PAOs) (Arjunan Babuponnusami, 2014; Yang Deng y Renzun Zhao, 2015) involucran la generación y uso de especies transitorias altamente reactivas principalmente el radical hidroxilo. Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) (Pignatello et al., 1999) o por otras formas de energía, y posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica (Melero et al., 2007; Mingliang Luo, 2009). Los PAOs son tecnologías especialmente útiles como pretratamiento antes de un tratamiento biológico para contaminantes resistentes a la biodegradación. La reacción de Fenton fue propuesta a comienzos de siglo XX (Fenton, 1894). Sin embargo, el estudio de su mecanismo fue posterior y se define como la generación catalítica de radicales hidroxilo de la reacción en cadena de ion ferroso (Fe^{2+}) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en un medio ácido según lo informado por Neyens y Baeyens (2009), (Melero et al., 2007).

La reacción se puede iniciar en la presencia de ión ferroso en medio ácido obteniéndose un radical hidroxilo. Luego, se produce la regeneración del catalizador ion ferroso. Aunque se

originan dos radicales, uno de ellos es más reactivo y es responsable de oxidar compuestos orgánicos originando a dióxido de carbono y agua. Una desventaja de este método es la oxidación de Fe^{2+} en solución y la contaminación del efluente tratado que no debe contener sales de hierro para poder ser vertido. Uno de los principales problemas asociados a la remediación ambiental es el tiempo de reacción y la capacidad de llegar a niveles exigidos por la ley ambiental vigente. El proceso denominado Fenton modificado o Fenton-like (Nannan Wang et al., 2016) puede superar limitaciones cuando no se dan condiciones naturales para la generación de los radicales hidroxilos o no se cuenta con la disponibilidad natural de sales ferrosas en medios ácidos y no es conveniente adicionarlas ya que se estaría adicionando un nuevo contaminante al medio (Gonzalez-Olmos et al., 2012). De esta manera se probaron distintos materiales ricos en hierro (Garrido-Ramírez et al., 2010; Marchetti et al., 2000) Los trabajos reportados en áreas relacionadas a la contaminación por hidrocarburos se concentran en el estudio del BTX (benceno, tolueno y xileno) y del MTBE (metil tert-butil éter) que son contaminantes que se denominan compuestos orgánicos volátiles y en el caso de este último tiene una alta solubilidad de agua (Neyens et al., 2003). Estos contaminantes se estudian juntos porque aparecen en derivados del petróleo como las naftas (Gonzalez-Olmos et al., 2009). Por eso, cuando se evalúa la contaminación de suelos (o aguas) próximos a los centros de producción de petróleo o gas natural (o a depósitos de las mismas), se emplea el parámetro "BTX total" que mide la concentración conjunta de esos compuestos. Están muy estudiados los procesos de adsorción de estos contaminantes en materiales naturales y artificiales como bentonitas (Duarte et al., 2013; Christidis et al., 2003).

Para ello se comenzaron a estudiar los procesos de adsorción y de oxidación de los contaminantes mediante diferentes diseños experimentales: en forma estática (batch) (Russo et al., 2014) y en forma dinámica (columna). El objetivo final de los ensayos, realizados a escala laboratorio, es analizar los resultados para escalarlos y aplicarlos en el armado de un filtro para la remoción de contaminantes orgánicos solubilizados en agua y/o suelos en condiciones naturales de acidez.

Para llegar a dicho objetivo se preparó un catalizador soportado en una zeolita (NZ-A-Fe) natural modificada y se estudió su comportamiento como adsorbente y catalizador de oxidación para soluciones neutras y acuosas de BTX (benceno, tolueno, xileno).

Desarrollo

a) Preparación del catalizador soportado

Un catalizador es una sustancia que acelera la velocidad de una reacción química sin consumirse en la misma. Se denomina soporte, a un sólido inerte que sirve para conferirle propiedades mecánicas al catalizador, sin presentar generalmente propiedades catalíticas propias. Las zeolitas son consideradas como un subconjunto de filtros moleculares con estructuras tridimensionales, cuyos marcos (framework) los constituyen unidades de AlO_4^{5-} y SiO_4^{4-} . La clinoptilolita natural comercial simbolizada como NZ se presenta en pequeñas "piedras" de aproximadamente 5 mm de diámetro, con tamaño y forma irregulares.

En este trabajo se usó una zeolita natural extraída en el territorio argentino denominada Clinoptilolita. La misma fue molida y tamizada con mallas N° 50 y N° 35 (ASTM E11-95), obteniendo partículas en el rango 0,3 a 0,5 mm (Russo et al., 2015). Luego la zeolita seleccionada fue lavada con agua destilada a fin de eliminar impurezas y secada a 80 °C. Se implementó un tratamiento para reemplazar parte de los iones y este material se simboliza como NZ-A. Este material es posteriormente enriquecido con solución de sulfato ferroso, con posterior reducción del mismo y se simboliza como NZ-A-Fe. El material resultante adquiere diferente coloración (Fig.1 der.)

La cantidad de hierro en el material final, se incrementa en un 50% m/m respecto del original.



Fig. 1. Muestra de zeolita natural NZ (izq.) y de zeolita modificada con Fe NZ-A-Fe (der.)

b) Experiencia de remoción de los compuestos orgánicos

Las experiencias se desarrollaron en sistema batch (b1) y en proceso continuo (b2).

En un proceso batch o por lotes la alimentación es cargada al comienzo de la operación en un recipiente y luego de un cierto tiempo el contenido del recipiente es removido o descargado. En este modo de operación, no hay transferencia de materia a través de las fronteras del sistema (entendiendo por sistema cualquier porción arbitraria o completa de un proceso establecido para el análisis). Esta operación también es llamada cerrada aunque no debe asociarse este término a que esté en contacto con la atmósfera, simplemente se los llama cerrados porque no hay ingreso de materia a ser procesada ni egreso de productos durante el tiempo en que ocurre la transformación.

En un proceso continuo hay un flujo permanente de entrada y de salida durante todo el tiempo que dura el proceso, esto es, siempre hay un flujo de materia que ingresa por las fronteras del sistema y otro que egresa por ellas mientras se lleva a cabo la transformación.

b1) Experiencias en Sistema estático.

b1-a) Con Bz

Se realizaron experiencias en frascos de 50mL donde se estudiaron los fenómenos de adsorción y oxidación bajo diferentes condiciones:

- i) la adsorción de Bz (usado como contaminante testigo) sobre NZ-A-Fe (3,6 g) con una posterior oxidación (Fig.2 a)
- ii) la simultánea adsorción y oxidación, en iguales condiciones experimentales que en i)

b1-b) Con BTX

Bajo este mismo criterio se procede a la oxidación de BTX en frascos de 100mL (5 mM de Bz, 4.9 mM de Tol y 1.8mM de Xil) luego de ocurrida la adsorción (similar a i) (Fig.2 b)



Fig. 2a. Arreglo experimental para b1-a)

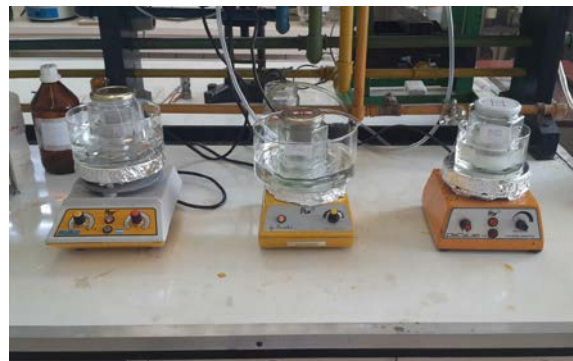


Fig. 2b Arreglo experimental para b1-b)

En ambos casos se trabajó con agitación y a temperatura 20°C.

b2) Columna (Sistema continuo).

Para evaluar la utilidad de un filtro utilizando el catalizador soportado se trabajó con una columna de vidrio de 1cm de diámetro y 15 cm de altura encamisada con circulación de agua (a temperatura ambiente) en contracorriente (Fig. 3).

Se empleó una bomba peristáltica Longer pump BT100-2J para circular la solución acuosa de los contaminantes dentro de la columna. Se cargó la columna con 5g de NZ-A-Fe. La altura ocupada por la zeolita fue de 7 cm.

Se preparó una solución de BTX adicionando volúmenes (μ l) de Bz, Tol y en una solución con el pH=7 regulado. A dicha solución se le agregó peróxido de hidrogeno. Y la concentración final de los contaminantes fue 1,8, 1,1 and 0,4 mM en Bz, Tol y Xil respectivamente. La temperatura se fijó en 20° C and y fue continuamente controlada con una camisa con recirculación de agua. Antes de comenzar con el paso de adsorción – oxidación, la columna fue enjuagada con agua destilada para ajustar el caudal. Se tomaron muestras del eluido de la columna a intervalos regulares de tiempo.

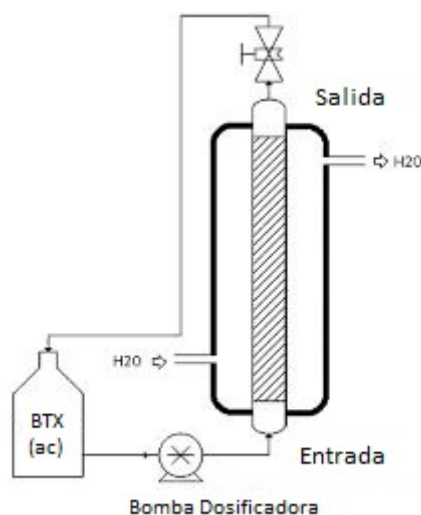


Fig. 3. Arreglo experimental en columna rellena conteniendo el catalizador

La concentración de BTX disuelto fue determinada mediante cromatografía gaseosa (CG).

Resultados y conclusiones

- Sistema batch

b1-a) i) En una primera etapa (~ 20 min) la concentración de Bz en solución disminuye sensiblemente por la adsorción del mismo en el catalizador (Fig.4 curvas B). Una vez agregado el peróxido, se inicia la reacción Fenton heterogénea verificándose, ser despreciable, la disminución de la concentración del peróxido de hidrogeno por degradación natural (Fig.4 C), según ec. (1):

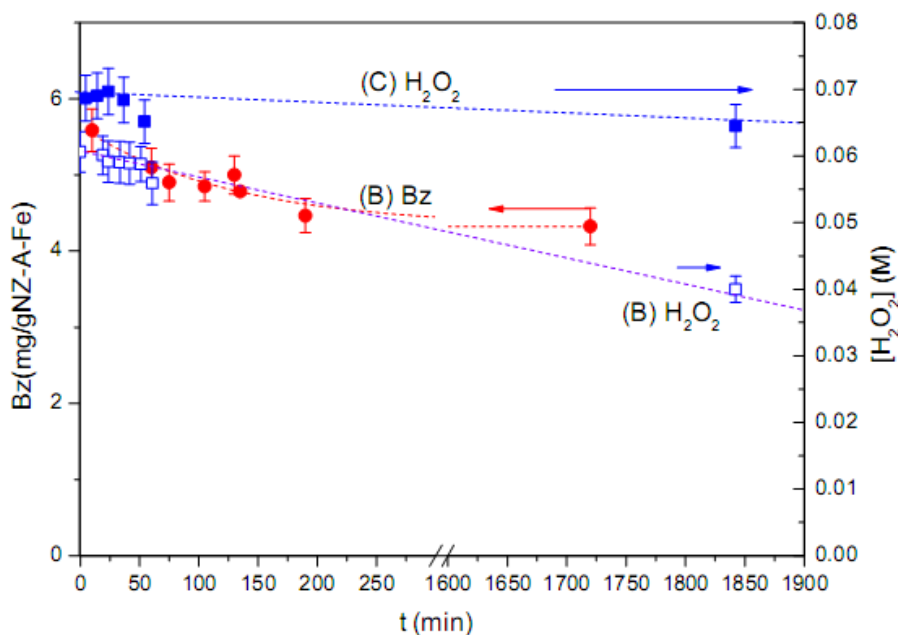
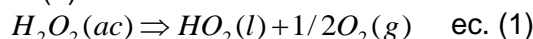


Fig. 4. Adsorción y oxidación simultánea de Bz sobre NZ-A-Fe (B). Blanqueo de H_2O_2 (C)

Al cabo de 24 hs se observó una disminución sustancial en la concentración de H_2O_2 en solución indicando que el proceso oxidativo fue llevado a cabo, mientras que la concentración de Bz en solución apenas variaba. Eso indica que el proceso de difusión de Bz desde la solución hacia el catalizador es mucho más lento que la difusión del H_2O_2 hacia el catalizador. En estas condiciones experimentales, el proceso de difusión del Bz desde la solución hacia el interior del material (NZ-A-Fe) es la etapa controlante de la reacción Fenton.

En este sistema, en el cual se acoplaron en serie los procesos de adsorción y oxidación, se logró una remoción del 38,7% en 24hs.

b1-a) ii) En el sistema donde se estudiaron los procesos simultáneos de adsorción - oxidación de Bz la remoción obtenida de Bz, en 24 hs, fue del 23,7% lo cual es un valor menor al obtenido en b1-a) i).

Estos resultados permitieron inferir que la oxidación depende fuertemente de la adsorción del contaminante sobre el material NZ-A-Fe y de la competencia de ambos procesos. La velocidad de adsorción del contaminante es el proceso controlante.

b1-b) Acoplar la adsorción con la oxidación catalítica fue motivado por las siguientes razones:

- Reducir el consumo de reactivos.
- Evitar la liberación de hierro durante todo el proceso.
- Mejorar el contacto contaminante - catalizador durante el proceso de adsorción.

Al iniciar el proceso, la velocidad de remoción de los contaminantes es rápida, y luego se ralentiza a medida que pasa el tiempo (Fig.5). Estos resultados muestran dos posibles procesos experimentales: la remoción de BTX progresa hasta el 60% en los 600 primeros minutos, pues fue removido del seno de la solución, luego decrece lentamente pues se está desarrollando el proceso de oxidación en la superficie de la zeolita donde la presencia de BTX se concentra en contacto con el catalizador esto ocurre entre los 600 y 1600 min de la experiencia. De esta manera se logra remover el 75% de los contaminantes.

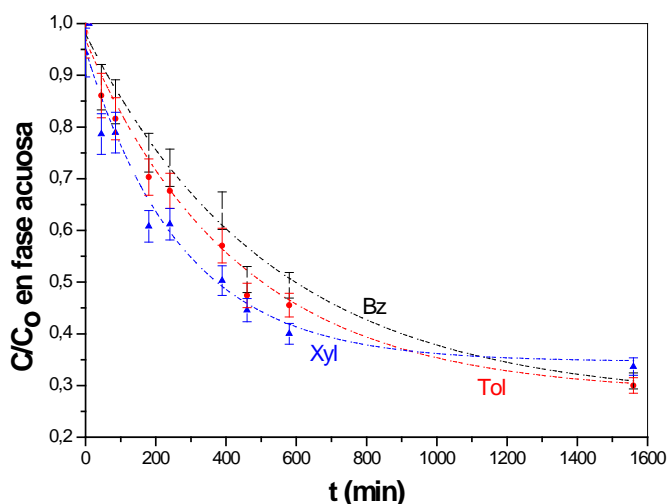


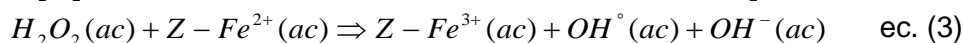
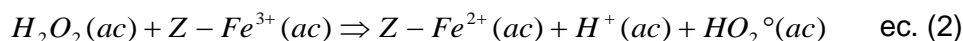
Fig 5: Remoción de BTX en la fase acuosa después de alcanzar el equilibrio de adsorción.

El BTX adsorbido es removido por oxidación y nuevos BTX migran desde la solución acuosa hacia la zeolita. Esta hipótesis cuenta con el apoyo de los resultados preliminares donde durante el decrecimiento lento la concentración de peróxido de hidrogeno decrece continuamente. Otras experiencias se encuentran en progreso

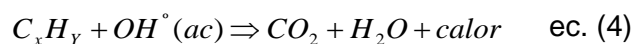
- *Columna (Sistema filtrante)*

Una vez que comienza a circular la solución acuosa con los contaminantes por medio del sistema de bombeo por el interior de la columna, comienzan los procesos de adsorción y luego oxidación de los compuestos orgánicos. La bomba peristáltica funcionó a 0,3 rpm y durante 870 min se llegó a degradar el 90% de los contaminantes (Fig.6 con área rayada). Así como se registraba las concentraciones de salida del sistema de los contaminantes, se analizaron muestras de peróxido de hidrogeno a lo largo del tiempo para cuantificar su concentración. Esta disminución de la concentración del peróxido indicó que el proceso de oxidación tuvo lugar en el interior del soporte o en la cercanía del catalizador pues la vida media del radical hidroxilo (OH^\bullet) es muy corta.

Los estudios realizados demuestran que la presencia de iones hierro (Fe^{2+} / Fe^{3+}) son los responsables de la generación del radical hidroxilo en presencia del peróxido de hidrogeno, según ec. (2) y ec.(3)



Este a su vez reacciona con los dobles enlaces de las moléculas de los contaminantes orgánicos según ec. (4):



C_xH_y Contaminante orgánico genérico

Generándose de esta manera, compuestos inocuos al medioambiente como dióxido de carbono y agua.

Después de realizar las experiencias en un sistema discontinuo y en la columna con recirculación, en condiciones experimentales similares teniendo en cuenta la siguiente relación de masa (BTX / NZ-A-Fe) y (peróxido de hidrogeno/ NZ-A-Fe); el tiempo de operación condiciones de acidez y temperatura se obtuvo una mayor eficiencia de degradación (DE) en la recirculación columna (90% comparado con 50%) (Fig.6).

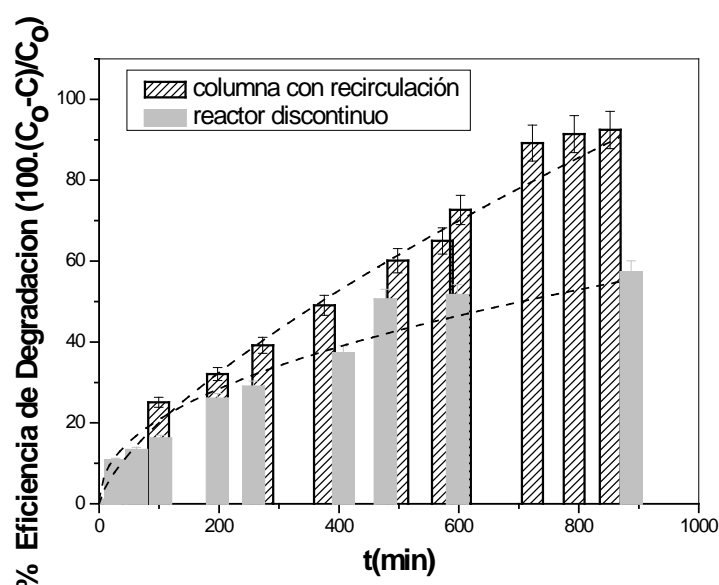


Fig 6: Comparación de rendimiento de la columna de recirculación (área rayada) y del reactor discontinuo (área sólida) para las mismas condiciones de trabajo

Estos resultados están relacionados con una mejora del contacto entre el catalizador y los contaminantes y los altos coeficientes de transferencia de masa de la columna de recirculación con respecto a los sistemas discontinuos. (Russo et.al 2018)

El hierro solubilizado permanece debajo 0.15 ± 0.05 ppm.

Los resultados obtenidos en numerosas experiencias en nuestro laboratorio para la remoción de benceno, tolueno, xileno, MTBE y colorantes azoicos, parte de las cuales se describen en el presente trabajo, fueron satisfactorios para fundamentar esta propuesta de armado de un filtro. Una de las ventajas del empleo de este material de relleno es que combina su capacidad de adsorción con procesos de oxidación, optimizando su vida útil.

Bibliografía

- Babuponnusami A. y Muthukumar K. (2014). A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 557-572.
- Chen L., Liu F., Liu Y., Dong H. y Colberg P.J.S. (2011). Benzene and toluene biodegradation down gradient of a zero-valent iron permeable reactive barrier. *Journal of Hazardous Materials*, 188 110-115.
- Christidis G.E., Moraetis D., Keheyan E., Akhalbedashvili L., Kekelidze N., Gevorkyan R., Yeritsyan H. y Sargsyan H. (2003). Chemical and thermal modification of natural HEU-type zeolitic materials from Armenia, Georgia and Greece. *Applied Clay Science*, 24, 79-91.
- Duarte F. M., Maldonado-Hodar. F. J. y Madeira L. M. (2013). Influence of the iron precursor in the preparation of heterogeneous Fe/activated carbon Fenton-like catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 458, 39– 47.
- Fenton, H.J.H. (1894). Oxidation of tartaric acid in presence of iron. *Journal. Chemistry. Soc.* 65 , 899-910.
- Garrido-Ramírez E.G., Theng B.K.G. y Mora M.L. (2010). Clays and oxide minerals as catalysts and nanocatalysts in Fenton-like reactions. A review. *Applied Clay Science*, 47, 182-192.
- Georgi A., Velasco Polo M, Crincoli K., Mackenzie K. y Kopinke F-D. (2016). Accelerated Catalytic Fenton Reaction with Traces of Iron: An Fe–PdMulticatalysis Approach. *Environmental Science and Technology*, 50, 5882–5891.
- Gonzalez-Olmos R., Martin M. J., Georgi A., Kopinke F-D., Oller I. y Malato S. (2012). Fe-zeolites as heterogeneous catalysts in solar Fenton-like reactions at neutral pH. *Applied Catalysis B: Environmental* 125, 51– 58
- Gonzalez-Olmos R., Roland U., Toufar H., Kopinke F.-D. y Georgi A. (2009). Fe-zeolites as catalysts for chemical oxidation of MTBE in water with H₂O₂. *Applied Catalysis B: Environmental*, 89, 356-364.
- Ivanova E., Mihaylov. M., Hadjiivanov K., Blasin-Aubé V., Marie O., Plesniar A. y Daturi M. (2010). Evidencing three distinct FeII sites in Fe–FER zeolites by using CO and NO as complementary IR probes. *Applied Catalysis B: Environmental*, 93, 325-338.
- Kang N. y Hua I. (2005). Enhanced chemical oxidation of aromatic hydrocarbons in soil systems. *Chemosphere*, 61, 909-922.
- Marchetti S.G., Cagnoli M. V., Alvarez A.M., Bengoa J.F., Mercader R.C. y Yeramian A.A. (2000). Study of the Ferzeolite-L system Part I: Characterization of iron species and their structural properties. *Applied Surface Science*, 165, 91-99.
- Melero J.A., Calleja G., Martinez F., Molina R. y Pariente M.I. (2007). Nanocomposite Fe₂O₃/SBA-15: An efficient and stable catalyst for the catalytic wet peroxidation of phenolic aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 131, 245–256.
- Mingliang Luo, D. B. y Brimblecombe P. (2009). Catalytic property of Fe-Al pillared clay for Fenton oxidation of phenol by H₂O₂. *Applied Catalysis B: Environmental*, 85, 201–206.
- Nannan Wang, Tong Zheng, Guangshan Zhang y Peng Wang. (2016). A review on Fenton-like processes for organic wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 4, 762–787
- Neyens E. y Baeyens J. (2003). A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. *Journal of Hazardous Materials B*, 98, 33-50.

- Pignatello J. J., Liu D. y Huston P. (1999). Evidence for an Additional Oxidant in the Photoassisted Fenton Reaction. *Environmental Science and Technology*, 33, 1832-1839.
- Russo A.V., Labout. A., Bercoff P.G. y Jacobo S.E. (2015). Optimization of iron load in a natural zeolite for heterogeneous catalysis. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, 4(4), 19-25.
- Russo A.V., Toriggia L. F. y Jacobo S.E. (2014). Natural clinoptilolite-zeolite loaded with iron for aromatic hydrocarbons removal from aqueous solutions. *Journal Material Science*, 49, 614-620.
- Russo A.V., De Angelis L.E y Jacobo S.E. (2018). Adsorption with catalytic oxidation in a recirculating bed reactor for contaminated groundwater. *Journal of Water Process Engineering* 23, 129-133.
- Shyh-Fang Kang, Chih-Hsaing Liao y Mon-Chun Chen. (2002). Pre-oxidation and coagulation of textile wastewater by the Fenton process. *Chemosphere*, 46, 923-928.
- Si-Hyun Do, Yong-Jae Kwon y Sung-Ho Kong. (2011). Feasibility study on an oxidant-injected permeable reactive barrier to treat BTEX contamination: Adsorptive and catalytic characteristics of waste-reclaimed adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 191, 19-25.
- Vignola R., Bagatin. R., De Folly D'Auris A., Flego C., Nalli M., Ghisletti D., Millini R. y Sisto R. (2011). Zeolites in a permeable reactive barrier (PRB): One year of field experience in a refinery groundwater—Part 1: The performances. *Chemical Engineering Journal*, 178, 204-211.
- Yang Deng y Renzun Zhao. (2015). Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. *Curr Pollution Rep*, 1, 167-176. doi: 10.1007/s40726-015-0015-z.

3

Analizando relaciones entre el precio de los cultivos y la opinión en Twitter

Xavier Ignacio González

Departamento de Gestión – Facultad de Ingeniería – Universidad de Buenos Aires.

Introducción

La predicción de los precios de los bienes en los mercados es un tema de estudio de mucho interés por parte de los negocios y la academia a lo largo de la historia. Este interés puede explicarse asumiendo que quien conozca de antemano cómo evolucionarán los precios en el futuro puede tomar decisiones transaccionales para aumentar su riqueza. Aunque gran parte de estos esfuerzos se dirigieron a predecir los precios de las acciones en los mercados financieros, parte de la literatura tuvo como objetivo analizar el comportamiento de los precios de los productos básicos [1], que también pueden comprarse y venderse en los mercados adecuados. El tema del modelado de precios de cultivos es de gran importancia práctica ya que muchos países en desarrollo (por ejemplo, Argentina) dependen en gran medida de las exportaciones de una pequeña cantidad de productos primarios.

Un enfoque reciente en el esfuerzo de predecir los precios de las acciones ha sido medir el sentimiento en las redes sociales [2]. En general, el análisis de sentimientos tiene como objetivo determinar la actitud de una persona que habla o escribe respecto a algún tema, utilizando el procesamiento del lenguaje natural, el análisis de textos y la lingüística computacional para identificar, extraer, cuantificar y estudiar sistemáticamente los estados afectivos. Tradicionalmente, el tema de estudio de los trabajos es identificar una marca (por ejemplo, Apple, Microsoft, o Toyota) y analizar el sentimiento hacia esa marca en las redes sociales para predecir el precio de sus acciones para la toma de decisiones de compra venta. Este trabajo muestra algunas relaciones encontradas al analizar el sentimiento de los tweets que mencionan un cultivo y la variación de su precio internacional. El objetivo es el estudio preliminar del potencial del análisis de las redes sociales para proporcionar información oportuna sobre los futuros precios de los cultivos para una mejor toma de decisiones de planificación agrícola.

¿Que es Twitter?

Twitter es un servicio de micro-blogging, es decir, una plataforma para que los usuarios puedan escribir y compartir mensajes sobre cualquier tema. Twitter tiene más de 500

millones de usuarios, generando 65 millones de tuits al día y maneja más de 800.000 peticiones de búsqueda diarias. Ha sido denominado como el «SMS de Internet».

La red permite enviar mensajes de texto plano de corta longitud, con un máximo de 280 caracteres (originalmente 140), llamados *tweets*, que se muestran en la página principal del usuario. Los usuarios pueden suscribirse a los tweets de otros usuarios – a esto se le llama "seguir" y a los usuarios abonados se les llama seguidores, o *followers*. Por defecto, los mensajes son públicos, pudiendo difundirse opcionalmente en forma privada, mostrándolos únicamente a unos seguidores autorizados. Los usuarios pueden *twitear* conectándose a internet mediante un teléfono o un computador. En la actualidad Twitter factura más de 2.500 millones de dólares anuales y tiene un valor en bolsa superior a los 10.000 millones de dólares. [3]

A modo ilustrativo, la pantalla de inicio de Twitter se muestra en la Figura 1.

Procesamiento de Datos

Se descargaron tweets que contenían la palabra *trigo*, o *wheat* en inglés, publicados entre enero y agosto de 2017 utilizando un script en *python*. Del conjunto de datos extraído con 77031 tweets guardamos la fecha de publicación y el texto (o mensaje) del tweet. Usamos la herramienta de lenguaje natural de Google [4] para extraer el sentimiento de cada texto. La puntuación devuelta por la herramienta consiste en dos elementos: **score** y **magnitud** [5].



Figura 1. Pantalla de inicio de Twitter

- el **score** del sentimiento varía entre -1.0 (negativo) y 1.0 (positivo) y corresponde a la inclinación emocional general del texto.
- la **magnitud** indica la fuerza general de la emoción (tanto positiva como negativa) dentro del texto dado, entre 0.0 e infinito. A diferencia del score, la magnitud no está normalizada; Cada expresión de emoción dentro del texto (tanto positiva como negativa) contribuye a la magnitud del texto (por lo que los bloques de texto más largos pueden tener mayores magnitudes).

Por ejemplo, un texto largo que exprese sentimientos positivos y negativos puede devolver un valor de score cercano a 0, porque la suma de elementos positivos y negativos se compensa. Esto no significa que el texto no tenga sentimiento. Para capturar esto, la magnitud devuelve el valor absoluto de los sentimientos. Para obtener un solo indicador de sentimiento de cada tweet, el estudio considera el producto de los dos indicadores, lo que llamaremos score ajustado.

Por otro lado, descargamos las series históricas diarias de precios internacionales de trigo de [6] y analizamos la variación semanal en porcentaje. Analizaremos las relaciones entre la serie de este valor con la serie del score ajustado de sentimiento promedio en misma semana.

Resultados

Con los datos obtenidos se ajustó un modelo lineal asumiendo que la variación semanal del precio es una función lineal del score ajustado promedio del sentimiento de los tweets.

$$\Delta \text{precio} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{bush}} \right] = \beta_1 \cdot \text{adj_score} + \beta_0$$

La estimación del coeficiente de máxima verosimilitud devuelve aproximadamente -664 y 31 para $\beta_1 + \beta_0$ respectivamente, con una significación inferior al 0.2%. Esto indica una fuerte correlación negativa entre las variables, lo que quiere decir que un tweet con la palabra trigo con un puntaje negativo tiene un impacto positivo en la variación del precio del trigo; 1% más alto (más bajo) el promedio de puntaje ajustado, aproximadamente 7 \$ por bushel más bajo (más alto) la variación de precio semanal. Vamos a discutir más a fondo esta idea en la siguiente sección. El coeficiente de correlación entre las dos series es de -51.2%.

La gráfica con la serie de las dos variables en una línea de tiempo se muestra en la Figura 2. Los puntos de tiempo considerados independientes se representaron en una gráfica de dispersión que se muestra en la Figura 3. En la semana 26 de 2017 (28 de junio), podemos verificar un pico en la variación semanal del precio alrededor del 60% con un pico 'bajo' alrededor de 0.01 en el puntaje de sentimiento ajustado.

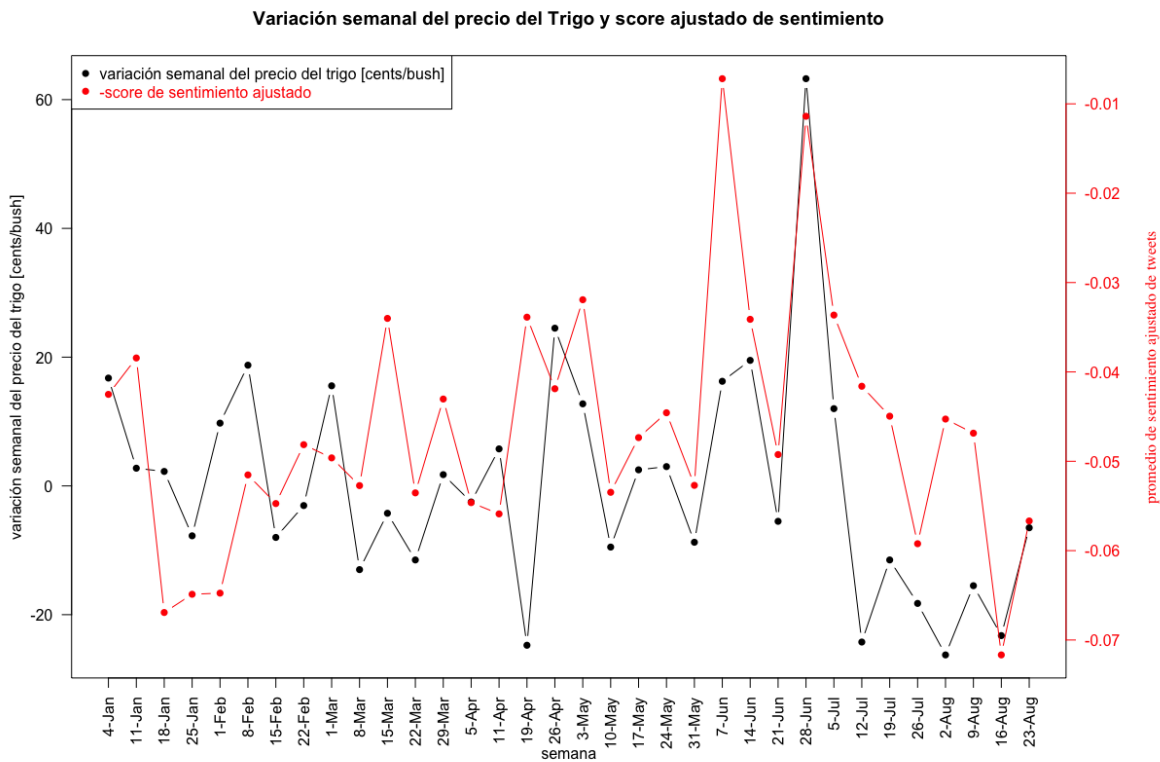


Figura 2. Pantalla de inicio de Twitter

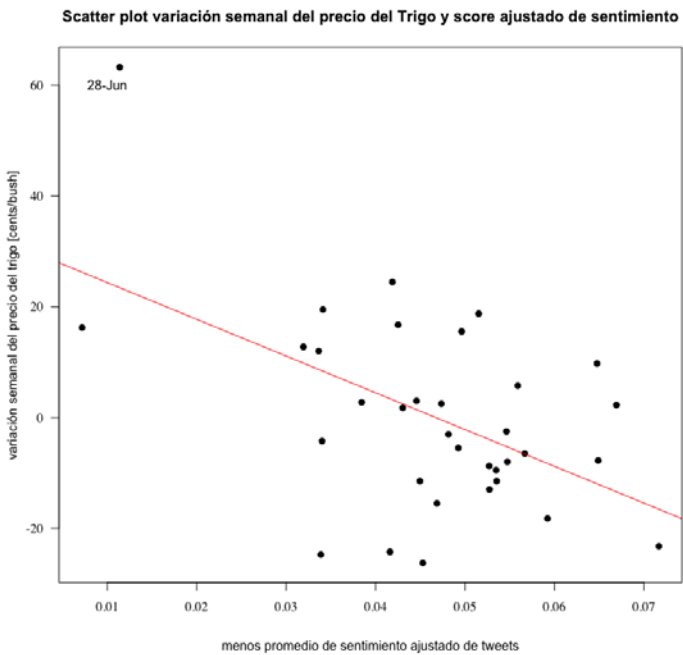


Figura 3. menos score ajustado promedio vs. variación semanal del precio del trigo.

Discusión

Los datos muestran que existe una relación significativa entre el sentimiento extraído de los tweets y la variación del precio del trigo. Un estado de ánimo positivo en el sentimiento parece estar asociado con una disminución en el precio semanal. Esto es posible porque una parte considerable de los tweets que contienen la palabra trigo describe los resultados de la producción de trigo. En esos casos, los tweets usan palabras positivas para comentar sobre algo relacionado con la producción. Por ejemplo, ver el tweet en la Figura 4 (izquierda) calificado como negativo (-0.81), publicado por Joe Weisenthal, un influencer de Bloomberg TV seguido por 148K personas en Jun-30. Él describe las condiciones para el cultivo doméstico de primavera como "las peores desde 1988". Esto, si es cierto, está asociado con niveles bajos de stock de trigo y, por lo tanto, está asociado con un aumento en el precio del trigo. De hecho, el pico en el precio se evidencia en las Figuras 2 y 3 alrededor de la semana del 28 de junio.

Por otro lado, podemos ver en la Figura 4 (derecha) un tweet publicado el 5 de agosto por el usuario 'HT Rea Farming', tal como se presentó en su biografía, una granja familiar de cuarta generación en el valle de Walla Walla que cría trigo sostenible y guisantes verdes, legumbres, semillas de maíz, alfalfa y pasto. Ellos describen la temporada de cosecha como "excelente" y, por lo tanto, su puntaje ajustado al sentimiento es alto y positivo (1.61). Este escenario está relacionado con una temporada próspera, altas existencias de trigo y, en consecuencia, bajo nivel de precios. Estos tweets son solo un ejemplo de cómo se puede analizar la información en las redes sociales para obtener información sobre el mercado de cultivos. Si bien encontramos en la exploración una relación entre el sentimiento de los medios sociales y la variación semanal de los precios, se necesita más análisis para comprender mejor los mecanismos existentes para poder construir mejores modelos para capturar este mecanismo y proporcionar información relevante a los responsables de las decisiones para mejorar la planificación agrícola.



Figura 4. Izquierda, tweet con score ajustado -0.81 (negativo); derecha, tweet con score 1.672 (positivo)

Comentarios Finales

El objetivo, tal como fue planteado, consistió en el estudio preliminar del potencial del análisis de las redes sociales para proporcionar información oportuna sobre los futuros precios de los cultivos para una mejor toma de decisiones de planificación agrícola. Se han encontrado evidencias de una relación fuerte entre el sentimiento de algunos usuarios y el precio internacional del trigo asociado con los tweets en referencia a la producción. Cuanto más positivamente los usuarios describen la producción, es de esperarse, en simultaneidad, un escenario de baja de precios del trigo y viceversa.

En este hallazgo corresponde hacer algunas aclaraciones. En primer lugar, la correlación encontrada no significa causalidad sino más bien el mismo fenómeno observado desde otro punto de vista. En los comentarios de las redes sociales puede encontrarse información sobre cuál es la situación en relación a la producción de Trigo y la situación es la que causa la variación de precio.

En segundo lugar, corresponde aclarar que la relación encontrada no permite hacer análisis predictivos del precio del trigo. La variación en el precio y las opiniones volcadas en Twitter aparecen en forma simultánea. Habría que profundizar el análisis para investigar la existencia de modelos predictivos que presenten una performance aceptable.

Como líneas de futuras investigaciones se propone extender el análisis realizado en el Trigo a otros cultivos como soja y maíz. También, se propone hacer un análisis semántico de los tweets para clasificar y evaluar solamente los tweets que describen la producción y no el conjunto de todos los tweets que mencionan la palabra *trigo*. Esto podría hacerse con modelos de temática (o topic modeling), como por ejemplo [6]. Por último, también se propone tomar los tweets que hayan sido publicados en el período correspondiente a la cosecha de cada cultivo y evaluar la posibilidad de anticipar las variaciones antes de que sucedan para poder aprovechar la información con la toma de mejores decisiones.

Referencias

- [1] Deaton, A., & Laroque, G. (1992). On the behavior of commodity prices. *The Review of Economic Studies*, 59(1), 1-23.
- [2] Bollen, J., Mao, H., & Zeng, X. (2011). Twitter mood predicts the stock market. *Journal of computational science*, 2(1), 1-8.
- [3] <https://es.wikipedia.org/wiki/Twitter>
- [4] <https://cloud.google.com/natural-language/?hl=en>
- [5] <https://www.macrotrends.net>

Hong, Liangjie, and Brian D. Davison. "Empirical study of topic modeling in twitter." Proceedings of the first workshop on social media analytics. acm, 2010.

4

Estudio de respuestas evocadas y conectividad cerebral durante la actividad cognitiva mediante registros intracraneales directos en humanos

Hesse Rizzi, Eugenia Fátima; Ibáñez, Agustín; Lew, Sergio

Instituto de Neurología Cognitiva (INECO) – Instituto de Ingeniería Biomédica (IIBM)

En las últimas décadas, en el campo de las neurociencias cognitivas, diversos estudios en animales y en humanos, utilizando diferentes técnicas, han evidenciado que los procesos cognitivos dependen de la coordinación dinámica de diversas áreas cerebrales que se acoplan de forma flexible a corta y larga distancia. Así, diversos procesos cognitivos (ej., el reconocimiento de objetos, el procesamiento de emociones, coordinación acción-lenguaje, o la toma de decisiones), dependerían no de un área específica que trabaja de forma aislada, sino de una fina dinámica intrínseca de ensamblajes neuronales.

Como señalan Lachaux y cols. (Lachaux, Rudrauf et al. 2003), el foco principal del mapeo de funciones cerebrales ha sido hasta hace muy pocos años la identificación de componentes individuales en las redes neuronales de gran escala que subyacen a la cognición. Hoy en día el foco de interés está girando hacia el problema del vínculo (binding problem) que consiste en explicar cómo el cerebro es capaz de integrar información procesada por distintas áreas y coordinar su actividad [1-4]. Se ha sugerido que redes neuronales funcionales a gran escala se forman dinámicamente implicando que distintas áreas de la corteza cerebral son necesarias para cada tarea específica [5, 6]. En los últimos años proliferan estudios de conectividad cerebral centrados en las interacciones dinámicas que permiten a estas áreas cerebrales actuar en conjunto. La idea directriz de este cambio de foco es que de un acto cognitivo unificado requiere integración cerebral a gran escala [1, 2].

Esta tendencia ha sido acompañada por desarrollos tanto metodológicos como teóricos. Una de las hipótesis en este campo es la que considera a la sincronía en determinadas frecuencias como un mecanismo de vinculación (binding by synchrony) [7-9]. Otra propuesta similar estudia el acoplamiento entre áreas mediante sincronía en frecuencias distintas [10, 11]. Estas propuestas consideran que solo grupos neuronales oscilando coherentemente pueden comunicarse efectivamente ya que sus ventanas de comunicación se abren al mismo tiempo, lo que permite que cambios de sincronía operen como un mecanismo para

formar conexiones funcionales dinámicas entre distintas poblaciones neuronales [12]. Un modelo que ha ganado apoyo empírico es el de complejidad de la consciencia el cual propone que la consciencia corresponde a la capacidad de un sistema para integrar información [13]. Relevantes para este proyecto son los desarrollos recientes en el análisis cuantitativo de redes complejas, basados principalmente en teoría de grafos, que muestran que el cerebro presenta propiedades características de una red compleja y brindan nuevas herramientas para estudiar su conectividad [14, 15]. Además, están los enfoques que consideran elementos del cerebro como una red de sistemas de dinámica no lineal acoplada [16] y análisis de entropía y complejidad [17].

Sin embargo, la mayoría de los estudios neurocientíficos se han realizado con técnicas de resonancia magnética funcional (fMRI) y electroencefalografía (EEG). La fMRI posee una excelente resolución espacial, pero una pobre resolución temporal. La dinámica temporal de los patrones de conectividad en tarea cognitivas o en reposo es un elemento crucial para entender el rápido acoplamiento y desacoplamiento entre diferentes regiones cerebrales. Por otro lado, la EEG posee una excelente resolución temporal pero determinar el origen anatómico de las señales registradas es complejo y limitado. Por tanto, el conocimiento de las redes neurales involucradas en el procesamiento de la cognición bajo estudio está restringido a medidas gruesas que no permiten conocer la dinámica temporal de las conexiones.

Existen otras técnicas que permiten el registro de señales intracraneales, la electrocorticografía intracraneal (iEEG). Éstos se obtienen mediante la electrocorticoencefalografía (ECoG) y la medición de potenciales de campo local (Local Field Potentials o LFP). Ambas son técnicas que de forma similar a la electroencefalografía (EEG) registran la actividad eléctrica del cerebro. LFP registra la actividad en la corteza cerebral mediante el implante de electrodos entrando en corteza (también llamado EEG Estereoóptico o SEEG) y en áreas internas mediante la inserción de electrodos profundos [18].

La principal aplicación de estas técnicas es la obtención de información para el planeamiento pre-quirúrgico en pacientes epilépticos que requieren cirugía resectiva (epilepsia refractaria con fracaso terapéutico farmacológico y con cumplimiento de criterios de cirugía). En su modalidad extraoperatoria los pacientes son primero sometidos a una cirugía, durante la cual se implantan los electrodos. A continuación permanecen internados con los electrodos implantados por un período típico de entre 5 y 10 días [19]. Durante este tiempo se realizan registros con el fin de localizar el foco epiléptico y estimulación con el fin de mapear funcionalmente las áreas afectadas y evaluar el resultado probable de la cirugía resectiva [20].

Los registros intracraneales en humanos, si bien invasivos, presentan varias ventajas. La cercanía de los electrodos respecto a la fuente de actividad eléctrica permite una buena resolución espacial (milímetros)[3]. Estas técnicas presentan también una mayor sensibilidad, permitiendo registrar frecuencias muy altas (0–500 Hz) [3]. Por último la relación señal/ruido es mucho mejor en estas técnicas por ser mucho menos susceptibles a artefactos oculares y musculares [21, 22]. Más aun, mediante el co-registro de la resonancia magnética estructural (RMN) y la tomografía axial computarizada (TAC), es posible establecer la localización espacial precisa de los electrodos. El hecho de que los pacientes que se someten a estos estudios permanezcan internados durante varios días ofrece una gran oportunidad para realizar investigación. Durante estos estudios los pacientes se encuentran conscientes y suelen ser capaces de realizar tareas cognitivas complejas en el tiempo libre entre los procedimientos clínicos a los que se los somete. Adicionalmente la calidad de los registros logrados con LFP permite realizar experimentos con muy pocos sujetos; típicamente uno o dos. Es por todo esto que en los últimos años estas técnicas han demostrado ser una poderosa herramienta en el estudio de la cognición humana [3, 4]. Así, al utilizar registros intracraneales, es posible capturar simultáneamente la dinámica espacial

y temporal de los ensambles neuronales [23], permitiendo su estudio de una manera mucho más precisa e informativa.

El presente proyecto tiene como objetivo estudiar la conectividad cerebral utilizando electroencefalografía (EEG) y potenciales de campo locales (LFP) en relación a tareas de actividad cognitiva (detección de daño intencional, procesamiento emocional, y tareas de acoplamiento entre sistema motor y lenguaje). Los paradigmas activos a utilizar tienen en común el acoplamiento o coordinación entre distintas áreas cerebrales. Se medirá: (a) la respuesta cerebral evocada en tareas de actividad cognitiva; (b) la actividad oscilatoria; (c) la conectividad cerebral en dichas tareas; (d) y se aplicarán métodos de aprendizaje automático (machine learning) en todas las anteriores dimensiones. Se utilizarán tareas de diferente grado de complejidad cognitiva a fin de detectar diferentes patrones de conectividad de acuerdo al nivel de acoplamiento entre procesos cognitivos y redes neuronales respectivas.

En particular, cabe mencionar tres tareas utilizadas:

1. Detección rápida de la intención de dañar. Se utiliza una adaptación del diseño propuesto por Decety [24], el cual ha demostrado ser útil en la evaluación de pacientes con patologías neurológicas o psiquiátricas en estudios de imágenes[25-29]. Los participantes ven secuencias de 3 imágenes (a modo de video) en las que dos personas interactúan. En algunos casos una persona agrede físicamente a otra intencionalmente, en otros ello ocurre accidentalmente o bien interactúan de forma neutra (por ejemplo, una le pasa un cuaderno a otro). El paciente debe decir para cada situación si la interacción fue intencional o accidental. Se encontró que entre cientos de regiones, la amígdala discrimina sistemáticamente la intención de dañar en menos de 125 milisegundos, y gatilla una red frontotemporal rápida y específica. Los resultados de este estudio en tres sujetos fueron publicados en la revista Brain, y el trabajo fue elegido para la tapa de Enero de 2016 de la revista[30].

2. Procesamiento emocional (DVT, del inglés Dual Valence Task). Este paradigma desarrollado por el equipo del INCyT[31-35], consiste en clasificar ejemplares de dos categorías de objetos (rostros de emociones positivas y negativas) y otros dos polos evaluativos (palabras agradables y desagradables) que aparecen en pantalla. Se han reportado en diferentes versiones de la tarea validadas, los correlatos conductuales y cerebrales del reconocimiento y la interferencia emocional, que depende de la integración multimodal de aspectos configurativos y emocionales del procesamiento de rostros, y del acoplamiento con procesos semánticos [31-37]. Se ha demostrado que existe una coordinación automática de la información semántica y emocional y un efecto de interferencia más tardía[32, 36]. Asimismo, se han provisto las fuentes cerebrales de la actividad cerebral generada por los estímulos semánticos y faciales del paradigma[33, 35, 38]. Utilizando registros intracraneales se ha estudiado la relación entre el desempeño conductual y los correlatos cerebrales. Se ha evidenciado que el acoplamiento entre áreas especializadas en el reconocimiento de objetos (giro fusiforme, surco temporal superior), el procesamiento emocional (amígdala) y áreas de procesamiento de la relevancia motivacional de la valencia de los objetos (región orbitofrontal y prefrontal en general) es mayor cuanto mejor es el desempeño utilizando una medida novedosa de conectividad (weighted Symbolic Mutual Information, wSMI). En la misma dirección, el análisis de patrones multivariados es más efectivo si el desempeño más eficiente (menor tiempo de reacción y mayor precisión). Actualmente este estudio se encuentra en revisión.

3. Tarea de lenguaje facial. Esta tarea novedosa desarrollada por nuestro equipo, se presentan palabras y el sujeto debe responder si están o no relacionadas con algún aspecto facial. Para la construcción de significado de una palabra, el cerebro recluta dos tipos de sistemas [39, 40]: el multimodal (independientes de la modalidad del estímulo)[4141] y mecanismos corporizados (redes sensoriomotoras específicas para la modalidad del estímulo

presentado) [42]. Sin embargo, a la fecha no se ha podido comprobar cómo estos sistemas contribuyen al surgimiento del significado. Tradicionalmente, esto se ha estudiado con verbos de acción, y los estudios han presentado resultados contradictorios. En particular, resulta problemático estudiar este fenómeno a través del sistema motor cuando las tareas implican una acción motriz (presionar algún botón de respuesta o dar la respuesta en voz alta), lo que por tanto presenta una contradicción: los resultados obtenidos, ¿se explican realmente por el reclutamiento de áreas motoras cuando se presentan verbos de acción, o bien, a la respuesta motriz en sí misma? A fin de evitar este problema, en este trabajo se utilizaron palabras asociadas con aspectos faciales para estudiar el involucramiento de las áreas de procesamiento facial en el surgimiento del significado, así dejando a un lado la contaminación generada por la respuesta motriz. Este trabajo se encuentra en fase de escritura.

El estudio del acoplamiento entre áreas cerebrales durante tareas activas y en reposo, en diferentes estados de consciencia podría brindar nuevos conocimientos sobre la dinámica cerebral de los procesos cognitivos y podría expandirse notoriamente gracias al uso de los registros intracraneales.

El presente estudio tiene también diversas implicancias clínicas para los pacientes, ya que permitirá (a) proveer una caracterización de las áreas cerebrales en términos de procesamiento sensorial, emocional y cognitivo; (b) brindar marcadores sutiles de estimulación cognitiva que informen al neurocirujano sobre las posibles consecuencias de la resección; (c), proveer medidas de conectividad asociadas a la actividad convulsiva, y finalmente (d) estudiar prospectivamente los efectos de la cirugía en base a la caracterización funcional de las áreas cerebrales, y finalmente (e) adquirir un entendimiento más profundo acerca de los mecanismos de redes neuroanatómicas que subyacen los procesos cognitivos estudiados y su afectación en estos pacientes no solo brinda un conocimiento neuroanatómico de dichos procesos, sino que podría en un futuro proporcionar a los clínicos la posibilidad de predecir y compensar los cambios emocionales y conductuales que con frecuencia afectan el funcionamiento cotidiano de las personas que sufren de estas condiciones.

Referencias

- [1] L. Luo, E. Rodriguez, K. Jerbi et al., "Ten years of Nature Reviews Neuroscience: insights from the highly cited," *Nat Rev Neurosci*, vol. 11, no. 10, pp. 718-26, Oct, 2010.
- [2] F. Varela, J. P. Lachaux, E. Rodriguez et al., "The brainweb: phase synchronization and large-scale integration," *Nat Rev Neurosci*, vol. 2, no. 4, pp. 229-39, Apr, 2001.
- [3] A. Ritaccio, P. Brunner, M. C. Cervenka et al., "Proceedings of the first international workshop on advances in electrocorticography," *Epilepsy Behav*, vol. 19, no. 3, pp. 204-15, Nov, 2010.
- [4] A. L. Roskies, "The binding problem," *Neuron*, vol. 24, no. 1, pp. 7-9, 111-25, Sep, 1999.
- [5] G. Buzsáki, *Rhythms of the brain*, Oxford; New York: Oxford University Press, 2006.
- [6] M. M. Mesulam, "From sensation to cognition," *Brain*, vol. 121 (Pt 6), pp. 1013-52, Jun, 1998.
- [7] E. Salinas, and T. J. Sejnowski, "Correlated neuronal activity and the flow of neural information," *Nat Rev Neurosci*, vol. 2, no. 8, pp. 539-50, Aug, 2001.

- [8] N. E. Crone, A. Sinai, and A. Korzeniewska, "High-frequency gamma oscillations and human brain mapping with electrocorticography," *Prog Brain Res*, vol. 159, pp. 275-95, 2006.
- [9] P. J. Uhlhaas, G. Pipa, S. Neuenschwander et al., "A new look at gamma? High- (>60 Hz) gamma-band activity in cortical networks: function, mechanisms and impairment," *Prog Biophys Mol Biol*, vol. 105, no. 1-2, pp. 14-28, Mar, 2011.
- [10] R. T. Canolty, E. Edwards, S. S. Dalal et al., "High gamma power is phase-locked to theta oscillations in human neocortex," *Science*, vol. 313, no. 5793, pp. 1626-8, Sep 15, 2006.
- [11] J. M. Palva, S. Palva, and K. Kaila, "Phase synchrony among neuronal oscillations in the human cortex," *J Neurosci*, vol. 25, no. 15, pp. 3962-72, Apr 13, 2005.
- [12] P. Fries, "A mechanism for cognitive dynamics: neuronal communication through neuronal coherence," *Trends Cogn Sci*, vol. 9, no. 10, pp. 474-80, Oct, 2005.
- [13] G. Tononi, and C. Koch, "The neural correlates of consciousness: an update," *Ann N Y Acad Sci*, vol. 1124, pp. 239-61, Mar, 2008.
- [14] E. Bullmore, and O. Sporns, "Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems," *Nat Rev Neurosci*, vol. 10, no. 3, pp. 186-98, Mar, 2009.
- [15] M. P. van den Heuvel, and H. E. Hulshoff Pol, "Exploring the brain network: a review on resting-state fMRI functional connectivity," *Eur Neuropsychopharmacol*, vol. 20, no. 8, pp. 519-34, Aug, 2010.
- [16] C. J. Stam, "Nonlinear dynamical analysis of EEG and MEG: review of an emerging field," *Clin Neurophysiol*, vol. 116, no. 10, pp. 2266-301, Oct, 2005.
- [17] F. Wendling, K. Ansari-Asl, F. Bartolomei et al., "From EEG signals to brain connectivity: a model-based evaluation of interdependence measures," *J Neurosci Methods*, vol. 183, no. 1, pp. 9-18, Sep 30, 2009.
- [18] D. Zumsteg, A. M. Lozano, and R. A. Wennberg, "Depth electrode recorded cerebral responses with deep brain stimulation of the anterior thalamus for epilepsy," *Clin Neurophysiol*, vol. 117, no. 7, pp. 1602-9, Jul, 2006.
- [19] D. R. Nair, R. Burgess, C. C. McIntyre et al., "Chronic subdural electrodes in the management of epilepsy," *Clin Neurophysiol*, vol. 119, no. 1, pp. 11-28, Jan, 2008.
- [20] R. P. Lesser, N. E. Crone, and W. R. Webber, "Subdural electrodes," *Clin Neurophysiol*, vol. 121, no. 9, pp. 1376-92, Sep, 2010.
- [21] T. Ball, M. Kern, I. Mutschler et al., "Signal quality of simultaneously recorded invasive and non-invasive EEG," *Neuroimage*, vol. 46, no. 3, pp. 708-16, Jul 1, 2009.
- [22] S. Noachtar, and J. Remi, "The role of EEG in epilepsy: a critical review," *Epilepsy Behav*, vol. 15, no. 1, pp. 22-33, May, 2009.
- [23] T. Ossandón, J. R. Vidal, C. Ciumas et al., "Efficient "Pop-Out" Visual Search Elicits Sustained Broadband Gamma Activity in the Dorsal Attention Network," *J Neurosci*, vol. 32, no. 10, pp. 3414-3421, 2012.
- [24] J. Decety, and J. M. Cowell, "The complex relation between morality and empathy," *Trends Cogn Sci*, vol. 18, no. 7, pp. 337-9, Jul, 2014.

- [25] S. Baez, E. Herrera, O. Gershanik et al., "Impairments in negative emotion recognition and empathy for pain in Huntington's disease families," *Neuropsychologia*, vol. 68, pp. 158-67, Feb, 2015.
- [26] S. Baez, E. Herrera, L. Villarin et al., "Contextual social cognition impairments in schizophrenia and bipolar disorder," *PLoS One*, vol. 8, no. 3, pp. e57664, 2013.
- [27] S. Baez, F. Manes, D. Huepe et al., "Primary empathy deficits in frontotemporal dementia," *Front Aging Neurosci*, vol. 6, pp. 262, 2014.
- [28] S. Baez, J. P. Morales, A. Slachevsky et al., "Orbitofrontal and limbic signatures of empathic concern and intentional harm in the behavioral variant frontotemporal dementia," *Cortex*, vol. 75, pp. 20-32, Feb, 2016.
- [29] S. Baez, A. Rattazzi, M. L. Gonzalez-Gadea et al., "Integrating intention and context: assessing social cognition in adults with Asperger syndrome," *Front Hum Neurosci*, vol. 6, pp. 302, 2012.
- [30] E. Hesse, E. Mikulan, J. Decety et al., "Early detection of intentional harm in the human amygdala," *Brain*, vol. 139, no. Pt 1, pp. 54-61, Jan, 2016.
- [31] A. Ibanez, E. Gleichgerrcht, E. Hurtado et al., "Early Neural Markers of Implicit Attitudes: N170 Modulated by Intergroup and Evaluative Contexts in IAT," *Front Hum Neurosci*, vol. 4, pp. 188, 2010.
- [32] A. Ibanez, E. Hurtado, R. Riveros et al., "Facial and semantic emotional interference: a pilot study on the behavioral and cortical responses to the Dual Valence Association Task," *Behav Brain Funct*, vol. 7, pp. 8, 2011.
- [33] A. Ibanez, A. Petroni, H. Urquina et al., "Cortical deficits of emotional face processing in adults with ADHD: its relation to social cognition and executive function," *Soc Neurosci*, vol. 6, no. 5-6, pp. 464-81, 2011.
- [34] A. Ibanez, R. Riveros, E. Hurtado et al., "The face and its emotion: right N170 deficits in structural processing and early emotional discrimination in schizophrenic patients and relatives," *Psychiatry Res*, vol. 195, no. 1-2, pp. 18-26, Jan 30, 2012.
- [35] A. Petroni, A. Canales-Johnson, H. Urquina et al., "The cortical processing of facial emotional expression is associated with social cognition skills and executive functioning: a preliminary study," *Neurosci Lett*, vol. 505, no. 1, pp. 41-6, Nov 7, 2011.
- [36] E. Hurtado, A. Haye, R. Gonzalez et al., "Contextual blending of ingroup/outgroup face stimuli and word valence: LPP modulation and convergence of measures," *BMC Neurosci*, vol. 10, pp. 69, Jun 26, 2009.
- [37] A. Ibanez, M. Melloni, D. Huepe et al., "What event-related potentials (ERPs) bring to social neuroscience?," *Soc Neurosci*, vol. 7, no. 6, pp. 632-49, 2012.
- [38] L. Amoruso, B. Couto, and A. Ibanez, "Beyond Extrastriate Body Area (EBA) and Fusiform Body Area (FBA): Context Integration in the Meaning of Actions," *Front Hum Neurosci*, vol. 5, pp. 124, 2011.
- [39] R. A. Zwaan, "Embodiment and language comprehension: reframing the discussion," *Trends Cogn Sci*, vol. 18, no. 5, pp. 229-34, May, 2014.
- [40] M. A. Ralph, E. Jefferies, K. Patterson et al., "The neural and computational bases of semantic cognition," *Nat Rev Neurosci*, vol. 18, no. 1, pp. 42-55, Jan, 2017.

[41] M. L. Seghier, "The angular gyrus: multiple functions and multiple subdivisions," *Neuroscientist*, vol. 19, no. 1, pp. 43-61, Feb, 2013.

[42] F. Pulvermuller, "Brain mechanisms linking language and action," *Nat.Rev.Neurosci.*, vol. 6, no. 7, pp. 576-582, 7/2005, 2005.

5

Reconocimiento de patrones en señales biomédicas: Una aplicación a la electrocardiografía.

Liberczuk Sergio Javier, Zanutto Silvano y Arini Pedro.

Instituto de Ingeniería Biomédica - Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires.

Las enfermedades cardiovasculares (ECV) son una de las principales causas de muerte en el mundo. Según datos de la organización mundial de la salud (OMS), en el 2014 tan sólo en Argentina el 35% del total de las muertes registradas se debió a este tipo de enfermedades. La actividad eléctrica del corazón, representada por el electrocardiograma (ECG), se ha utilizado ampliamente para la detección de enfermedades cardíacas. Los registros a largo plazo requieren la detección automática de eventos cardíacos. En el presente trabajo doctoral se estudian técnicas novedosas en el área de inteligencia artificial, aprendizaje maquina y aprendizaje estadístico, por medio de las cuales una computadora sea capaz de predecir patologías cardíacas que se reflejen en la señal de electrocardiograma (ECG) como por ejemplo la detección temprana de infarto de miocardio. El modelado, la simulación y el análisis de las señales de ECG, ayudan a comprender mejor los fenómenos fisiológicos subyacentes así como permiten el desarrollo de algoritmos y dispositivos capaces de operar en tiempo real, reduciendo de este modo los costos que requiere el diagnóstico de las patologías mencionadas cuando las mismas son realizadas por el equipo médico.

Introducción

Las enfermedades cardiovasculares (ECV) son una de las principales causas de muerte en el mundo. Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), solo en Argentina, el 35% de todas las muertes registradas se debieron a este tipo de enfermedad en 2014 [1]. Es por esto que la detección temprana y el control de ECV tiene un fuerte impacto en la calidad de vida de miles de personas a nivel local y mundial. La investigación biomédica es construida sobre dos pilares: la colección de una masa enorme de datos clínicos de pacientes sanos o patológicos, y el análisis de estos datos para determinar patrones que describen tanto conductas fisiológicas como patológicas. Se deben desarrollar algoritmos específicos para realizar el análisis y procesamiento de los datos y así poder obtener tanto información útil como transferible. Esta información permite la semiautomatización de

diagnosticos más precisos soportados por dispositivos específicos diseñados para este propósito.

La señal del electrocardiograma (ECG) registra la actividad eléctrica del corazón, mostrando la variación temporal del potencial eléctrico a partir de electrodos dispuestos convenientemente en la superficie del tórax. La morfología de la señal y su interpretación a partir de la detección de sus ondas características (los llamados puntos fiduciales que comprenden las ondas P, Q, R, S, T), así como varios cálculos que surgen de dicha detección (segmento ST, Intervalo QT, intervalo PR y otros) permiten el diagnóstico de diferentes patologías: diversas arritmias cardíacas, enfermedades isquémicas o anomalías de conducción, así como otros tipos de ECV que afectan la repolarización ventricular (RV) de tejido cardíaco y puede ser detectado de antemano mediante un análisis apropiado de la señal de ECG [2]. Además, este análisis puede ser útil en el diagnóstico de otras enfermedades extracardíacas como el tromboembolismo pulmonar u otras alteraciones electrolíticas. Por lo tanto este análisis no invasivo y de bajo costo sigue siendo una herramienta fundamental para la evaluación cardiovascular de los pacientes que llegan por demanda espontánea a las salas de emergencia de cualquier centro salud.

Como se ha mencionado, el estudio del electrocardiograma, sus longitudes de onda, sus intervalos temporales y patrones ha sido objeto de intensa investigación, ya que aporta información sustancial de la función del corazón. La obtención de señales cardíacas de alta resolución a partir de un electrocardiograma ruidoso sigue siendo un problema de preocupación para la comunidad de Ingeniería Biomédica.

A pesar de la rica literatura en este campo, todavía hay muchas aplicaciones clínicas que carecen de herramientas de procesamiento confiables para extraer los componentes débiles de ECG contaminados con ruido de fondo, que en última instancia ofrece mucha información sobre las características sutiles de la señal de ECG. Recientemente la investigación en el procesamiento automatizado de ECG se centra en la delimitación o delineado de sus ondas, la detección de patrones y/o compresión de datos [3],[4]. La modelización y síntesis de ECG se aplica a la clasificación de latidos, compresión, reconstrucción y/o generación de señales sintéticas de ECG.

Entre los trabajos que han abordado la idea del modelado de la secuencia de ondas en un ECG, para extraer y reconocer patrones podemos mencionar los artículos [6], [7] que proponen un modelo y un método de clasificación para el complejo QRS usando una base ortonormal de funciones de Hermite. Baali [8] propone un modelo paramétrico basado en transformaciones ortogonales, que involucra el mapeo del ECG en el dominio de los valores singulares, mientras que Philips y De Jonghe [9] aplican una aproximación polinomial para la compresión de datos de ECG. Por su parte Suppappola et al. [10] van a centrarse en el modelado de ECG basado en ondas con pulsos gaussianos. De este modo, resulta un ciclo completo de ECG en una suma de tales pulsos gaussianos. Cada gaussiana se caracteriza por su ubicación, su amplitud y su anchura. El trabajo mencionado [10] presenta un algoritmo iterativo para aproximar un ECG determinado mediante el modelo y la estimación de sus parámetros, siendo uno de los parámetros por determinar el número de pulsos que se necesitan.

En Clifford et al. [11] también surge la idea de modelar con la suma de curvas gaussianas. En este caso se utiliza un número fijo de 5 funciones gaussianas, una para cada onda característica. El trabajo [5] propone un modelo dinámico cuyas trayectorias de solución reproducen las señales de ECG sintéticas. El modelo genera una trayectoria en el espacio de estados (x,y,z) . La cuasi-periodicidad aproximada se refleja en el movimiento del camino alrededor de un atractivo ciclo límite a la unidad circunferencia en el plano (x,y) . Cada período está representado con una revolución en torno a este ciclo límite. Para describir la asimetría de la onda T, proponen como alternativa usar dos ondas gaussianas para representarla.

En Clifford et al. [12] han propuesto un método para encontrar los parámetros que mejor reproducen el ritmo de un ECG real dado, logrando así compresión con pérdida. El ajuste de parámetros se lleva utilizando una optimización no lineal (Método de gradiente descendente) para minimizar la distancia euclidiana entre los datos y el modelo simulado (error de mínimos cuadrados). Esta permitiría, según los autores mencionados, predecir el rendimiento del modelo en un segmento de un ECG y facilitar el rechazo de los latidos para un estudio específico. La desviación de estos parámetros con respecto a los parámetros fisiológicos indicarían un cambio en la morfología de las ondas constitutivas del ECG, mostrando alteraciones que señalan o sugieren ciertas patologías.

El modelo permite entonces la representación tridimensional de cualquier ECG, fisiológico o patológico, que luego puede ser utilizado no solo en esquemas de filtrado que requieren un modelo sino también en compresión, clusterización y / o clasificación de patrones.

Para comprimir y clasificar las señales de ECG o para sintetizar señales con ciertas patologías primero necesitamos saber cómo varían los parámetros del modelo para las diferentes morfologías. Para esto necesitamos leer el segmento de señal real partiendo de condiciones iniciales con el menor conocimiento a priori posible. Es por esto que en la primer parte de este trabajo proponemos un nuevo método para encontrar los parámetros que mejor representan un latido dado. Este nuevo método puede partir de condiciones iniciales (CI) alejadas de las buenas, es decir es un método robusto frente a CI empobrecidas [15].

El método se basa en ideas de simulación de Monte Carlo. Se propone explorar el espacio de parámetros de forma aleatoria pero inteligente buscando el conjunto que mejor ajuste el latido. El problema puede plantearse como un problema inverso que responde a la siguiente pregunta: ¿Qué parámetros son los más confiables para generar un determinado latido del corazón? El método está inspirado en ideas provenientes del filtrado particulado. Probando un alto número de problemas directos evalúa la fiabilidad de cada uno de ellos mediante una función de aptitud apropiada [15].

Para validar nuestro estimador de parámetros de Monte Carlo, se realizaron una serie de simulaciones, y se compararon con un algoritmo de optimización local. El objetivo es mostrar que nuestro método es capaz de encontrar los parámetros que mejor se ajustan a una señal dada real, incluso si la búsqueda se inicia en un punto lo suficientemente lejos de la zona óptima. Además, queremos mostrar que el buen rendimiento se alcanza tanto en el ECG normal como en señales patológicas.

Base de datos

Señales reales fueron tomadas de una Bases de datos conocida como el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) disponible en Physio-Bank [13]. El Instituto Nacional de Metrología de Alemania ha proporcionado esta compilación de ECGs digitalizados para investigación, Benchmarking algorítmico o con fines didácticos para los usuarios de PhysioNet. Los ECGs fueron recolectados de voluntarios sanos y pacientes con diferentes cardiopatías por el profesor Michael Oeff, M.D., en el Departamento de Cardiología de Clínica Universitaria Benjamin Franklin en Berlín, Alemania. Contiene registros de 52 sujetos sanos y 148 pacientes con infarto de miocardio y también proporciona algunos pacientes con otras patologías como la miocardiopatía, bloqueo de rama, disritmia, hipertrofia miocárdica y enfermedad valvular del corazón. Los ECGs están digitalizados a 1Khz, con 16 bits con una resolución en un rango de 16,384mV. Cada registro incluye 12 derivaciones simultáneas además de las derivaciones ortogonales de Franz. Por último, se encuentra disponible el historial médico del paciente.

Clasificación

En la segunda parte extraemos las características de los latidos de ECG normales y patológicos con el método explicado anteriormente. Finalmente utilizamos los parámetros del modelo McSharry (muy conocidos en la literatura antes) pero nunca con este propósito para representar y clasificar las señales de ECG provenientes de 48 sujetos sanos y 95 pacientes con Infarto de Miocardio. El objetivo fue clasificar y separar los latidos fisiológicos de los latidos que presentan infarto de miocardio usando un kernel lineal en una Máquina de vectores de soporte (MVS).

El algoritmo consta de 2 etapas, la etapa de entrenamiento y la etapa de prueba. En la fase de entrenamiento de este algoritmo, cada vector de características se considera como un punto en un espacio N-dimensional ($N = 15$ en nuestro caso), etiquetado con su correspondiente clase (HS Fisiológico) o infarto de miocardio (MI latido con infarto). El algoritmo encuentra el hiperplano que mejor separa estas dos clases, al maximizar una función de margen que explica la separación entre los puntos en ambas clases.

En la fase de prueba, se evalúan nuevos vectores, para determinar en qué lado del espacio se encuentran, y asignando así la etiqueta de clase correspondiente.

MVS es un algoritmo de aprendizaje automático supervisado, adecuado tanto para problemas de clasificación como para problemas de regresión. En algunos casos, los datos no son completamente separables. Para estos casos, se añade una penalización a la función de margen penalizando los puntos que se encuentran en el medio espacio equivocado. También hay casos en que los datos no se pueden separar linealmente en el espacio de las características original. Para esos casos, la separación es realizada en un espacio dimensional superior. Se realiza después de proyectar vectores de datos en un nuevo espacio, utilizando una función del kernel. En el nuevo espacio, los puntos sí se separan con un hiperplano de forma lineal que representa una frontera de separación no lineal en el espacio de características original.

En nuestro problema, nosotros encontramos que el algoritmo MSV fue capaz de separar linealmente los datos en un espacio de 15 dimensiones. Los resultados son muy alentadores ya que obtuvimos una tasa de éxito superior al 93% [16].

Referencias

- [1] S. Mendis, T. Armstrong, D. Bettcher, F. Branca, J. Lauer, C. Mace, V. Poznyak, L. Riley, V. Silva, and G. Stevens, "Global status report on noncommunicable diseases 2014: World health organization," 2015.
- [2] R. J. Martis, U. R. Acharya, and H. Adeli, "Current methods in electrocardiogram characterization," *Computers in biology and medicine*, vol. 48, pp. 133–149, 2014.
- [3] C. Li, C. Zheng, and C. Tai, "Detection of ecg characteristic points using wavelet transforms," *IEEE Transactions on biomedical Engineering*, vol. 42, no. 1, pp. 21–28, 1995.
- [4] Y. Wu and L. Zhang, "Ecg classification using ica features and support vector machines," in *Neural Information Processing*. Springer, 2011, pp. 146–154.
- [5] P. E. McSharry, G. D. Clifford, L. Tarassenko, and L. A. Smith, "A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 50, no. 3, pp. 289–294, 2003.

- [6] L. Sornmo, P. O. Borjesson, M.-E. Nygard, and O. Pahlm, "A method for evaluation of qrs shape features using a mathematical model for the ecg," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, no. 10, pp. 713–717, 1981.
- [7] M. Lagerholm, C. Peterson, G. Braccini, L. Edenbrandt, and L. Sornmo, "Clustering ecg complexes using hermite functions and self-organizing maps," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 47, no. 7, pp. 838–848, 2000.
- [8] H. Baali, R. Akmeliawati, M.-J. E. Salami, A. Khorshidtalab, and E. Lim, "Ecg parametric modeling based on signal dependent orthogonal transform," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 21, no. 10, pp. 1293–1297, 2014.
- [9] W. Philips and G. De Jonghe, "Data compression of ecg's by highdegree polynomial approximation," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 39, no. 4, pp. 330–337, 1992.
- [10] S. Suppappola, Y. Sun, and S. A. Chiaramida, "Gaussian pulse decomposition: an intuitive model of electrocardiogram waveforms," *Annals of biomedical engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 252–260, 1997.
- [11] G. Clifford, A. Shoeb, P. McSharry, and B. Janz, "Model-based filtering, compression and classification of the ecg," *International Journal of Bioelectromagnetism*, vol. 7, no. 1, pp. 158–161, 2005.
- [12] G. Clifford and P. McSharry, "Method to filter ecgs and evaluate clinical parameter distortion using realistic ecg model parameter fitting," in *Computers in Cardiology*, 2005. IEEE, 2005, pp. 715–718.
- [13] Physionet. [Online]. Available: <https://www.physionet.org/physiobank/database>
- [14] J. Pan and W. J. Tompkins, "A real-time qrs detection algorithm," *IEEE transactions on biomedical engineering*, no. 3, pp. 230–236, 1985.
- [15] S. Liberczuk and L. Bergamini and P. Arini, "Heart beat parametric modeling based on monte carlo fitting techniques". XXI Congreso Argentino de Bioingeniería, X Jornadas de Ingeniería Clínica, 2017.
- [16] S. Liberczuk and L. Bergamini, "Model Based Feature Extraction Method For Myocardial Infarction Detection", Congreso Argentino de Mecánica Computacional, 2018, Vol XXXVI, págs. 1807-1814.

6

Estudio de Técnicas de procesamiento para la clasificación de materiales dieléctricos

Albert, Raymundo José¹; Galarza, Cecilia^{1,2}

¹ Centro de Simulación Computacional para Aplicaciones Tecnológicas, CONICET.

² Facultad de ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es poder caracterizar objetos a partir de su composición y forma. Los sensores que utilizan señales UWB (Ultra WideBand) se caracterizan por transmitir señales en una banda de frecuencias muy amplia, de forma tal que no interfiera con otros sistemas en bandas de frecuencias licenciadas o no.

Los radares convencionales son sistemas de banda angosta, donde uno puede detectar un blanco y medir su posición. Sin embargo, la transmisión de señales UWB sobre un objeto resulta en una señal reflejada que transporta un gran cantidad de información, de forma tal que puede ser reconocido entre otros blancos de diferentes características. Esto se debe al hecho que la señal reflejada incluye información que depende sólo de la geometría, dimensiones, forma y propiedades eléctricas del blanco, haciendo posible la identificación. En la actualidad, UWB es considerada una tecnología ideal para el diseño de sensores capaces de estimar y detectar blancos ocultos de tamaño pequeño. Este es el caso de varias aplicaciones en el campo del diagnóstico médico o del sensado no invasivo. Otras aplicaciones posibles son el seguimiento de objetos en movimiento; detección o visualización de objetos o estructuras por debajo del nivel del suelo.

Introducción

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar de forma no-invasiva, la composición de muestras de materiales dieléctricos, utilizando señales UWB (Ultra Wideband).

La FCC (Federal Communications Commission) define a los dispositivos UWB como dispositivos cuyo ancho de banda fraccional es mayor que 0.25 u ocupa 0.5 GHz o más del espectro. En este caso los límites del ancho de banda se toman en -10dB.

En la actualidad, UWB es considerada una tecnología ideal para el diseño de sensores de alta resolución capaces de identificar blancos ocultos de pequeño tamaño. Éste es el caso

de varias aplicaciones en el campo del diagnóstico médico, de sensado no invasivo o de inspección de una zona difícil acceso o de alto riesgo para las personas. Asimismo, los sistemas UWB son capaces de caracterizar una gran cantidad de materiales tanto conductores como dieléctricos.

El problema concreto a abordar es el estudio de técnicas de procesamiento estadístico de señales aplicadas a la detección y clasificación de blancos utilizando señales UWB.

Antecedentes

Cuando una onda electromagnética ilumina un objeto, se establece una respuesta forzada a medida que la onda recorre el mismo. Dicha respuesta tiene una duración finita y está relacionada con la geometría y la composición del material del objeto, así como también con las características de la onda incidente. Esta respuesta se la conoce como respuesta temprana (early time response) y tiene información sobre las características locales del fenómeno (ubicación del observador, punto de impacto del impulso sobre el blanco, etc). Una vez que el frente de onda se alejó del blanco, se observa la respuesta natural del blanco, caracterizada por una sumatoria de senoidales amortiguadas que se conoce como respuesta tardía (late time response). Esta porción de la respuesta es de particular interés ya que presenta información sobre la composición del blanco, es decir su tamaño, forma y propiedades eléctricas.

La señal total dispersada se puede representar como la combinación de dos componentes: una respuesta temprana y una componentes de respuesta tardía. Esté modelo fue inicialmente propuesto en [1] y se conoce como método de expansión en singularidades (SEM por sus siglas en inglés).

Mediante el método de expansión en singularidades, la señal dispersada por un objeto se puede describir como

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} c_i e^{\gamma_i t} + y_{ET}(t) \quad (1)$$

donde $\gamma_i = -\alpha_i + j\omega_i$ son las resonancias naturales asociadas al objeto, α_i es el factor de amortiguamiento, ω_i es la frecuencia de resonancia natural, c_i es el residuo asociado al i -ésima resonancia natural e $y_{ET}(t)$ es una función entera que modela la respuesta tardía. Desafortunadamente, la separación de las dos componentes no es posible [2].

Las resonancias naturales son de particular interés ya que caracterizan al objeto en forma unívoca y su conocimiento puede ser utilizado para la identificación o clasificación de distintos objetos. Las frecuencias naturales están asociadas a las propiedades de resonancias del objeto. En particular, las resonancias se dividen en dos clases. Resonancias internas que se producen debido a las múltiples reflexiones en el interior del objeto, y las resonancias externas que se producen debido a las corrientes que se inducen en la superficie del objeto cuando interactúa con el campo electromagnético incidente. Para objetos compuestos por conductores eléctricos perfectos, todas las frecuencias naturales son externas, debido a que ningún tipo de onda puede penetrar el material. Por otro lado, los dos tipos de resonancias están presentes en objetos compuestos por materiales dieléctricos. Las resonancias externas son altamente dependientes de la geometría del objeto en sí y no tanto de la composición del material. Por el contrario, las frecuencias internas están determinadas por las características internas del objeto y resultan más útiles para diferenciar distintos materiales. Desafortunadamente, las resonancias internas

muestran pequeños factores de amortiguamiento y la exacta identificación de las resonancias establece un desafío.

La estimación de los parámetros de una suma de exponenciales complejas es un tema ubicuo en muchos problemas de las ciencias y la ingeniería [3]. Este problema, conocido como de análisis espectral, ha sido estudiado largamente dentro del área de Procesamiento Estadístico de Señales. En el pasado se han desarrollado varios métodos de alta resolución como el algoritmo MUSIC [4], el ESPRIT [5] o el matrix pencil method (MPM) [6]. Sobre la base de este enfoque en [7], los autores utilizan a test de verosimilitud generalizado para la clasificación de distintos blancos. Con este objeto se obtienen resultados robustos frente a ángulos de incidencia inciertos y otras condiciones ambientales. Sin embargo, se necesita saber el orden del sistema, que puede ser un parámetro difícil de estimar cuando se trabaja con materiales dieléctricos. Además, todos estos métodos se aplican en la región sólo a la respuesta tardía. En una perspectiva diferente, se han desarrollado otras técnicas utilizando la información de la región de la respuesta temprana, como [8], donde se usan transformaciones de tiempo-frecuencia.

Planteo del Problema

Sea $y(kT_s)$ la señal dispersa por el blanco iluminado. Luego, aproximando (1) por una suma finita de M términos, se obtiene

$$y(kT_s) = \sum_{i=1}^M c_i z_i^k + w(kT_s), k = 0, \dots, N; \quad (2)$$

donde T_s es el tiempo de muestreo, $z_i = e^{y_i T_s}$ y $w(kT_s)$ es una señal de ruido. Cada blanco queda unívocamente caracterizado por el conjunto de frecuencias naturales o resonancias z_1, \dots, z_M . El problema entre manos es luego obtener una estimación de dicho conjunto a partir de un conjunto finito de muestras de $y(kT_s)$.

Como se mencionó anteriormente la solución clásica al problema de identificar las frecuencias naturales es el matrix pencil method, donde los polos z_i son la solución de un problema de autovalores generalizados. A partir de la respuesta observada $y(k)$, se construye la matriz de Hankel de dimensiones $(N-L) \times (L+1)$ donde $M \leq L \leq N-M$.

$$H = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \cdots & y(L) \\ y(1) & y(2) & \cdots & y(L+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-L-1) & y(N-L) & \cdots & y(N-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

A continuación se definen dos matrices de dimensión $(N-L) \times L$, H_1 y H_2 , donde la primera se obtiene borrando la última columna de H , y la segunda se obtiene borrando la primer columna. El pencil matricial se define como

$$H_1 - \lambda H_2. \quad (4)$$

Cuando la señal $y(kT_s)$ no está contaminada con ruido, el rango del pencil matricial en (4) es M mientras $\lambda \neq z_i$, $i = 1, \dots, M$. Cuando $\lambda = z_i$, el rango del pencil se reduce en uno, y z_i

corresponde a un autovalor generalizado de (H_1, H_2) . Cuando H_2 es de rango completo, los z_i se pueden hallar resolviendo el problema de autovalores

$$H_2^+ H_1 - \lambda I_L, \quad (5)$$

Donde H_2^+ es la pseudo-inversa de H_2 , y I_L es la matriz identidad de dimensión L .

Cuando el ruido es nulo, es posible demostrar que los únicos valores de λ que resuelven el problema de autovalores generalizados del pencil (H_1, H_2) son z_1, \dots, z_M , es decir, corresponden a las frecuencias naturales buscadas. Sin embargo, al considerar señales ruidosas, el pencil suele ser de rango completo para cualquier escalar complejo λ . Para superar este problema, se han propuesto varios procedimientos. Todos ellos obtienen una aproximación de la matriz de Hankel original que permite separar el efecto del ruido sobre la señal inicial. En un primer enfoque [9], se realiza una descomposición en valores singulares de la matriz de Hankel original y sólo se mantiene los valores singulares dominantes. Este procedimiento no garantiza la estructura Hankel de la matriz resultante. Una solución a este problema fue analizada en [10] [11] [12], donde se utiliza un procedimiento iterativo para resolver el problema. Alternativamente, en [13] [14], el problema fue abordado resolviendo un problema de mínimos cuadrados totales.

Los procedimientos anteriores requieren del conocimiento a priori del valor de M o deben estimarlo a partir de los datos experimentales [15] [16]. Incluso cuando se conoce el valor de M , el cálculo de los autovalores generalizados puede ser un problema delicado. Las matrices que conforman el pencil matricial son matrices rectangulares por lo general mal condicionadas. En particular, en el caso de la clasificación de materiales dieléctricos, estas matrices exhiben una mezcla de autovalores bien condicionados y mal condicionados. Es decir, pequeñas perturbaciones en la señal medida, resultan en variaciones muy grandes de los autovalores calculados. Éste es el caso cuando los modos de oscilación se encuentran concentrados en una zona del plano, como es el caso de las resonancias internas de una esfera de material dieléctrico. Resolver directamente el problema de autovalores generalizados en el caso de la clasificación de materiales dieléctricos requiere luego lidiar con técnicas de estimación espectral de alta resolución.

Estructura del pencil (H_1, H_2)

Una alternativa para resolver este problema fue propuesta en [17] [18]. Acá, cada material conocido está identificado por el conjunto de frecuencias naturales que es conocido a priori. Estos trabajos explotan la estructura del pencil (H_1, H_2) obtenido a partir de las muestras experimentales para determinar la región del espacio complejo donde se ubican sus autovalores generalizados. Luego el problema de clasificación resulta en verificar si las frecuencias correspondientes a un material particular se encuentran contenidas en la región de autovalores generalizados del pencil (H_1, H_2) . En caso afirmativo se dice que el material testeado es del tipo del material conocido. En caso negativo, se deduce que son de distintos tipos.

En [19] se define el rango numérico para un pencil (H_1, H_2) como

$$W_{\|\cdot\|}(H_1, H_2) = \{\theta \in \mathbb{C}: \|H_1 - \lambda H_2\| \geq |\theta - \lambda|, \forall \lambda \in \mathbb{C}\}. \quad (6)$$

Por lo tanto, la siguiente definición nos permite clasificar la señal sin resolver explícitamente el problema de autovalores generalizados propuesto en el MPM.

Sea $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_p\} \in \mathbb{C}$ el conjunto de frecuencias naturales del material tipo Z . Se consideran dos matrices H_1, H_2 construidas a partir de la señal observada $y(kTs)$. Decimos que $y(t)$ corresponde a la clase Z si y sólo si $z_i \in W_{\|\cdot\|}(H_1, H_2)$ para todo $i = 1, \dots, p$.

Definimos el conjunto Z como el conjunto candidato que caracteriza a la clase candidata, $y(t)$ es la señal observada, y (H_1, H_2) es el par observado.

Esta definición nos permite reemplazar el problema de clasificación por uno de inclusión de conjuntos.

Resultados

Se simula el campo eléctrico dispersado mediante la solución de Mie en el rango de frecuencias de 1 GHz a 5.9 GHz. Se agrega ruido blanco como ruido de medición. La onda incidente es un pulso gaussiano. Se simula el campo retrodispersado para dos esferas de igual radio, $a = 0.07$ metros, pero diferente constante dieléctrica. La primera tiene un $\epsilon_1 = 2.12 - 0.053j$ y otra con $\epsilon_2 = 7.0 - 5.25j$.

Figura 1. Campo eléctrico dispersado por la esfera 1 (izquierda), esfera 2 (derecha).

Teóricamente hay una cantidad infinita de frecuencias naturales para la esfera. Sin embargo, es posible seleccionar subconjuntos disjuntos para caracterizar cada esfera. La selección de estas frecuencias es un problema delicado que determinará el desempeño de la técnica de clasificación. Para este trabajo seleccionamos un conjunto de 10 resonancias para definir la clase de la esfera 2.

A continuación se prueba el esquema de clasificación usando el campo dispersado por la esfera 1 como la señal observada, y el conjunto de frecuencias definido para la esfera 2 como el set de clasificación.

En la figura 2. vemos una realización particular del rango numérico para diferentes niveles de ruido (SNR). También se observan los diferentes conjuntos de frecuencias naturales (cruces azules para la esfera 1, y cruces rojas para la esfera 2). Notar que el conjunto correspondiente a cada señal simulada siempre se encuentra dentro del rango numérico. Y el otro conjunto está afuera. Esto no siempre es el caso para todas las realizaciones por lo que se espera que para algunas realizaciones se puedan cometer errores de clasificación.

(a) SNR = 10 dB.

(b) SNR = 20 dB.

Figura 2. Rango numéricos asociados al campo eléctrico dispersado por la esfera 1.

Conclusiones

(c) SNR = 25 dB.

(d) SNR = 30 dB.

En el presente trabajo, se propone un algoritmo de clasificación de materiales dieléctricos basado en la identificación de las resonancias naturales. En lugar de estimar las resonancias naturales y compararlas con resonancias teóricas en una base de datos, se propone un esquema de clasificación formulando un problema inverso. Es decir, dado un conjunto de resonancias, se evalúa si el conjunto corresponde a la señal que se está observando. Con esta proposición, se superan algunos inconvenientes observados en el *matrix pencil method*, como por ejemplo la inestabilidad en el cómputo de los autovalores y la estimación del orden del modelo.

Como se mencionó anteriormente, las frecuencias resonantes son independientes de ángulo en que incide la señal como también de la polarización pero sus residuos asociados no lo son. Por lo tanto, teóricamente se tiene un conjunto único de frecuencias asociado a un objeto pro cuando se mide las señales dispersadas se observara sólo un subconjunto de estas resonancias. Esto hace que las elecciones de la frecuencias cnadidatas sea un paso critico en el esquema de clasificación propuesto.

Bibliografía

- [1] Baum, C. E., 1971. *On the singularity expansion method for the solution of electromagnetic interaction problems*. Defense Technical Information Center, .
- [2] Pearson, L. W.; Wilton, D. R. and Mittra, R. (1982). *Some implications of the laplace transform inversion on SEM coupling coefficients in the time domain*, electromagnetics 2 : 181-200.
- [3] Stoica, P. and Moses, R., 2005. *Spectral Analysis of Signals*. Pearson Prentice Hall, .
- [4] Schmidt, R. (1986). *Multiple emitter location and signal parameter estimation*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation 34 : 276-280.
- [5] Roy, R. and Kailath, T. (1989). *ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques*, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing 37 : 984-995.
- [6] Hua, Y. and Sarkar, T. (1990). *Matrix pencil method for estimating parameter of exponentially damped/undamped sinusoids in noise*, IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing 38 : 814-824.
- [7] Mooney, J.; Ding, Z. and Riggs, L. S. (1998). *Robust Target identification in white gaussian noise for ultra wide-band radar systems*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation 46 : 12.
- [8] Chen, W. C. and Shuley, N. (2014). *Robust Target Identification Using a Modified Generalized Likelihood Ratio Test*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation 62 : 264-273.
- [9] Hua, Y. and Sarkar, T. K. (1991). *On SVD for estimating generalized eeigenvalue of singular matrix pencil in noise*, IEEE Transactions on Signal Processing 39 : 892-900.
- [10] Li, Y.; Liu, K. J. R. and Razavilar, J. (1997). *A parameter estimation scheme for damped sinusoidal signals based on low-rank Hankel approximation*, IEEE Transactions on Signal Processing 45 : 481-486.
- [11] Lu, B.; Wei, D.; Evans, B. L. and Bovik, A. C. (1998). *Improved matrix pencil methods*, 2 : 1433-1437.
- [12] Cadzow, J. A. (1988). *Signal enhancement a composite property mapping algorithm*, IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing 36 : 49-62.
- [13] Boutry, G.; Elad, M.; Golub, G. H. and Milanfar, P. (2005). *The Generalized Eigenvalue Problem for Nonsquare Pencils Using a Minimal Perturbation Approach*, SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications 27 : 582-601.

- [14] Dicle, C.; Camps, O. I. and Sznaier, M. (2013). *The Way They Move: Tracking Multiple Targets with Similar Appearance*, : 2301-2311.
- [15] Stoica, P. and Selen, Y. (2004). *Model-order selection: a review of information criterion rules*, IEEE Signal Processing Magazine 21 : 36-47.
- [16] Gavish, M. and Donoho, D. L. (2014). *The Optimal Hard Threshold for Singular Values is $\frac{4}{\sqrt{3}}$* , IEEE Transactions on Information Theory 60 : 5040-5053.
- [17] Albert, R.; Bouza, M.; Altieri, A. and Galarza, C. (2017). *Dielectric classification by sensing scattering field*, 2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC) : 1-6.
- [18] Albert, R. and Galarza, C. (2018). *Classification of matrices using their numerical range*, 2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON) .
- [19] Chorianopoulos, C.; Karanasios, S. and Psarrakos, P. (2009). *A definition of numerical range of rectangular matrices*, Linear and Multilinear Algebra 57 : 459-475.

Tomografía de Internet: medición de tráfico y su relación con la topología

Esteban Carisimo y José Ignacio Alvarez-Hamelin

CoNexDat, INTECIN (UBA-CONICET)

1. Introducción a la temática: Fundamentos de TCP/IP

Resulta sumamente difícil encontrar una definición certera del significado de la palabra Internet en la actualidad. La disruptiva aparición de esta tecnología y su rápida adopción por miles de millones de usuarios ha hecho que esta palabra pueda tomar innumerable cantidad de acepciones. Por lo tanto, el objetivo de esta sección es poder establecer un punto de partida claro, desde el cual se puedan introducir las nociones técnicas. En efecto, dichas nociones serán presentadas a través de las bases que fundaron los protocolos TCP/IP. Esta labor se presenta como esencial para en este trabajo para poder luego comprender el objeto de la investigación es este campo.

La familia de protocolos TCP/IP fue diseñada con el objetivo de poder comunicar y acceder a recursos computacionales lejanos a fines de los años sesenta. Este objetivo se situaba como una prioridad en esta época, ya que los recursos computacionales eran escasos y onerosos, por lo cual surgía como una necesidad la posibilidad de acceder a ellos desde ubicaciones remotas.

Para cumplir tal finalidad el protocolo de Internet (Internet Protocol, IP) fue diseñado en el marco de lo que en comunicaciones se entiende como una pila de protocolos. Esto quiere decir, que la comunicación de datos digitales entre un extremo y el otro está compuesta por una cadena ó pila de protocolos, en la cual cada eslabón cumple una tarea dependiendo de cual sea su rol dentro de la transmisión de información. El paradigma de la pila requiere que cada eslabón dependa del anterior y del siguiente. Sin embargo, las tareas realizadas por cada elemento de la pila son autosuficientes, esto quiere decir que no existe dependencia ni necesidad de conocimiento del modo de operación de las capas aledañas. En el caso de la pila de protocolos TCP/IP, donde IP es una sus componentes, la organización según el esquema de pila surge como una necesidad para poder entregar independencia e interoperabilidad entre los diferentes protocolos, utilizados por cada uno de los dispositivos conectados en la red.

El fin del protocolo IP es proveer un protocolo que permita distribuir la información desde un origen hacia un destino con el cual se quiere interactuar. Teniendo en cuenta las limitaciones computacionales de la época, el alto costo de los semiconductores y la escasa capacidad

de las líneas de comunicaciones, el protocolo IP fue creado bajo tres paradigmas: conmutación de paquetes, máximo esfuerzo y sin conexión.

La conmutación de paquetes es el único de los tres paradigmas que se necesita explicar para enmarcar el trabajo. Este es un paradigma de intercambio de información, el cual fue introducido por Leonard Kleinrock, uno de los encargados de dar forma a Internet. Sin entrar en detalles de este modelo, el paradigma de conmutación de circuitos es el antónimo de la conmutación de paquetes, que se usa en las comunicaciones telefónicas tradicionales. La propuesta se basa en que el intercambio de información use un esquema similar al modelo postal. En este caso, los datos transmitidos constan de dos partes: la información útil (la carta), y la información del destinatario (su remitente). Entonces, en el protocolo IP se debe agregar la información de las direcciones de origen y de destino, lo cual se hace por medio de las denominadas direcciones IP.

Continuando con la analogía del sistema postal, habiendo agregado el remitente, ahora la información, o mejor dicho el paquete, es entregado a la red, que se encargará de entregar el paquete al destino simplemente utilizando la dirección del remitente. La operación logística del sistema postal, que se da por medio de carteros, en Internet se da por medio de una cadena de intermediarios llamados routers. Los routers son los encargados de interconectar las partes de Internet. Además cada router debe conocer a que intermediario debe darle el paquete de manera tal que éste pueda acceder a destino.

2. Internet: Aspectos técnicos de la operación de una red de escala global

Habiendo presentado el origen y el objetivo del protocolo IP, esta sección se abocará a describir cuál es el mecanismo por el cual los intermediarios, routers, aprenden en que sitio de la red se encuentra cada uno de los usuarios.

En primer lugar, debemos introducir el concepto de topología de red. Internet es el resultado de la interconexión de miles de redes a lo largo del planeta. Esta interconexión se da por medio de los routers, quienes son los intermediarios entre redes. Producto de esta interconexión, cualquier dispositivo conectado a la red será capaz de intercambiar información con cualquier otro.

Aunque a nivel de infraestructura física Internet se observe como una colección de routers interconectados entre si formando una red, Internet se encuentra estructurado a nivel de organización, las cuales se denominan Sistemas Autónomos (del inglés Autonomous Systems, AS). Un AS, tal como su nombre lo indica es una organización la cual posee independencia administrativa absoluta para diagramar, configurar, interconectar y expandir su red. Esto quiere decir, que un AS será una colección de routers y redes bajo la administración de una organización. Esta organización tendrá la potestad de solicitar direcciones IP para luego utilizarlas en su red, configurar su ingeniería de tráfico, como así también de celebrar contratos comerciales. Esta independencia le da la potestad a los AS de interconectarse con otros AS cuando ambos lo crean conveniente. La interconexión de los AS es lo que da forma finalmente a Internet y por lo cual se conoce a la red como la red de redes.

Habiendo previamente explicado como Internet funciona y cuál es el rol de los routers en el envío de información, ¿cuál es el interés de ver Internet a nivel de AS en lugar de routers si son los routers quien finalmente ejecutan las tareas? La respuesta está dada por un nivel de granularidad y de escala. En la actualidad Internet está conformado por 60.000 AS y consecuentemente el número de routers es aún mayor. Si cada entidad toma su propia

política de envíos dentro de su red, resulta ciertamente innecesario observar la granularidad a nivel de routers. En cambio, si tomamos nuevamente la analogía del sistema postal, donde cada router es un cartero y cada AS es una compañía postal, es más relevante conocer cuáles son las compañías involucradas en el envío que los carteros que finalmente harán la tarea.

Esto también se debe a implicancias tecnológicas, para lo cual primero debemos introducir la noción de protocolos de ruteo. La estructura de Internet es tolerante a cambios en la topología y es algo que se buscó en su diseño. La idea subyacente se expresa en que la red debe ser capaz de ajustarse a cambios debido a incorporación de nuevos participantes o eventuales fallas. Entonces, si la forma de la red cambia a lo largo del tiempo, los routers necesitan contar con un mecanismo el cual les informe los nuevos caminos para acceder a destino. La propagación de la información necesaria para acceder a un destino está dada en los protocolos de ruteo.

Entonces, si esta información correspondiente al ruteo se propaga a cada uno de los routers, por cada nuevo cambio introducido en Internet, habría un problema de escala. En cambio Internet, cuenta con un protocolo de ruteo en dos pasos, protocolos de ruteo interno y protocolos de ruteo externos.

El protocolo de ruteo externo se llama Border Gateway Protocol (BGP), donde cada organización le informa a los AS vecinos a cuáles de ellos se encuentra interconectado y cuáles son las rutas que conoce para acceder a destinos en Internet. La replica de este procedimiento entre todos los AS que conforman la red genera que la información se propague a todos los extremos de Internet.

Por otro lado, los protocolos de ruteo interno, tales como RIP y OSPF, son los cargados de propagar la información aprendida por BGP hacia los routers que pertenecen al AS. También son los encargados de propagar, adentro de un AS, los cambios que pueden aparecer en la topología de la organización.

3. Ecosistema de Internet: Motivaciones

La estructura de Internet organizada a través de Sistemas Autónomos le brinda cada una de las organizaciones que la componen la autonomía para administrar su infraestructura. Dado que un objetivo tácito de Internet es poder tener alcance global, es decir que cualquier usuario final pueda interactuar con cualquier otro, los AS tienen la necesidad de interconectarse para cumplir tal fin. Entonces producto de la autonomía y la necesidad de interconexión, los AS tendrán la libertad de elegir con que otros AS conectarse de manera tal de poder intercambiar paquetes con el resto de Internet. Entonces aquí surge la pregunta de cuáles serán los AS a los cuales se conectará un AS dado, y cual sería el motivo para que esto finalmente ocurra.

En primer lugar, se podría pensar una alternativa donde todos los AS están conectados entre si. Sin embargo, aquí aparece una limitación técnica desde el punto de vista fáctico. Para que dos AS estén interconectados deben tener un medio físico que los conecte. Esto no quiere decir que no puedan intercambiar información a través de un tercero, pero la interconexión impone la restricción que ambos compartan un medio físico. Entonces, aquí

la limitación surge en que Internet tiene organizaciones operando en todas partes del mundo, pero no todas tienen presencia en todos los rincones del planeta. Por lo tanto, la conclusión es que dos organizaciones pueden interconectarse si tienen presencia física contigua, de cualquier otra manera lo deberán hacer por medio de AS intermediarios.

En segundo lugar, se debería pensar el caso en donde una organización no este dispuesta a conectarse libremente con otra. Este caso surge cuando una organización de menor envergadura está interesada en interconectarse con una organización de mayor porte. Este caso queda aún más evidente cuando un AS nacional está interesado en interconectarse con un AS de cobertura global, el cual funcione como intermediario con AS en sitios remotos. Entonces, para superar este interés asimétrico, el AS de mayor despliegue solicita una contraprestación económica por brindar tal intermediación. En efecto, la interconexión de Internet queda encuadrada en limitaciones técnicas de medios físicos supeditada intereses meramente comerciales.

La naturaleza comercial de la interconexión de Internet, establece que la interconexión entre los AS pueda ser clasificada según el intercambio comercial que haya entre estas dos organizaciones. Es importante destacar que dicha clasificación basada en factores económicos tiene una correspondencia unívoca con la estructura de Internet y las características de la interconexión. En primer lugar describiremos la interconexión cliente-proveedor, escenario en el cual el cliente le paga una tarifa al proveedor para que la interconexión ocurra. A cambio, la contraprestación del proveedor, quien tiene mayor visibilidad de Internet, será intermediar con el resto de los AS. Esto quiere decir, que el proveedor brindará su infraestructura para recibir el tráfico entrante y saliente del cliente hacia el resto de Internet.

El segunda categoría es la interconexión entre pares, donde dos AS se interconectan sin que ninguno de los dos le exija una tarifa al otro. Esta interconexión libre de cargo se da ya que ambas organizaciones encuentran un rédito en el hecho de celebrar la interconexión. Por lo tanto, al no haber posición dominante, no surge la imposición de una tarifa. Retomando la dinámica cliente-proveedor, donde el proveedor pone al servicio su infraestructura en pos de intermediar por su cliente, en los acuerdos entre pares esto no ocurre. En esta clase de acuerdos no existe la intermediación. La razón principal por la cual se da esta interconexión es para que los usuarios de ambos AS puedan acceder los unos a los otros por medio de este nuevo vínculo físico. En este caso, no se podrá usar tal infraestructura para poder alcanzar el resto de la red. Eventualmente si dos AS se interconectan puede ser que si tienen clientes, estos puedan utilizar la interconexión entre pares de sus proveedores, si es que dicho acceso resulta económicamente provechoso para sus proveedores.

Por último mencionaremos a los IXPs, como una categoría de vínculos entre pares extendida. Existen gran cantidad de pares de AS potenciales de llevar a cabo una interconexión entre pares, donde ninguno de los dos exija una tarifa y esto represente un rédito para ambas organizaciones. Sin embargo, aquí la limitación se presenta nuevamente como una imposibilidad física ya que ambas organizaciones no comparten ningún medio físico. Más aún, abundan los casos donde dos AS con infraestructura desplegada en la misma región y potenciales de crear un acuerdo de pares no cuentan con vínculo de pares. Esto se debe principalmente al costo de construir o alquilar una infraestructura que los vincule físicamente.

Dado el conocimiento de esta limitación, los IXPs surgen como una solución por la cual los AS pueden generar interconexión entre pares por medio de un único medio físico. Los IXPs reúnen en único punto gran cantidad de Sistemas Autónomos, todos los cuales son accesibles a través de un sólo medio físico. Entonces, ahora la cantidad de participantes es lo que genera el incentivo para llevar a cabo la inversión, ya que es considerable el número de organizaciones a las que se puede acceder a costo nulo.

Para entender los IXPs tomemos el siguiente ejemplo. Un IXP reúne en su infraestructura a 10 AS, lo que quiere decir que por medio de un único medio físico, cada uno de ellos podrá acceder a los 9 participantes restantes. Esto significa que 10 medios físicos son suficientes. En ausencia del IXP si todos quisieran interconectarse entre si, serían necesario 45 medios físicos (cada uno de ellos necesitaría conectarse con los otros 9). Esto muestra, a medida que el IXP reúne más participantes, es más atractivo unirse para los AS, generando un círculo virtuoso.

Dado que la interconexión entre pares, queda solamente restringida para los AS directamente involucrados en esta interconexión, esta conectividad permanece totalmente oculta desde fuera de dichos AS. Aquí pongamos un ejemplo en donde se contraste relaciones cliente-proveedor y entre pares. En una relaciones entre pares, el proveedor se muestra ante el resto de los AS como un intermediario con su cliente. Dado su rol de intermediario, es ineludible el hecho que cliente y proveedor disponen de un medio físico por el cual intercambian tráfico. En el caso de interconexión entre pares, la infraestructura de interconexión queda restringida a los AS involucrados, por lo tanto, ninguno de los AS ofrecerá ese dato al exterior. Esto se debe a que si lo ofreciera, se estaría presentado como un intermediario de su par, quien lo le paga ninguna tarifa por ejercer ese rol.

Dada la naturaleza privada de los vínculos entre pares, la visibilidad que se tiene de la interconexión en Internet esta sesgada. Aquí es sesgo varía en función de la información que le fue develada al punto desde el cual se observa la red. Esta opacidad genera un límite en el conocimiento y lo modelos que se pueden generar de Internet.

4. Contenido multimedia, Cloud computing y el rol de las redes de distribución de contenido en el ecosistema de Internet

Habiendo definido las características del ecosistema de Internet conformado por la composición de los AS y su interconexión, ahora haremos foco en su rol para la distribución del contenido que es transportado a través de Internet. En particular en esta sección nos enfocaremos en el contenido multimedia, el cuál ha crecido exponencialmente en la última década.

Desde principios de los años 2000, pero más acentuado luego de 2010, Internet se ha vuelto en una red de servicios multimedia. El masivo crecimiento de las plataformas de video on-demand, tales como YouTube o Netflix, han llevado a que cerca del 70% del tráfico de Internet en hora pico sea a causa de bytes de video provenientes de estas plataformas.

A su vez, durante la pasada década han surgido las redes sociales, las cuales por medio de su elevado número de usuarios (del orden de hasta miles de millones), han tomado un rol central en la generación y distribución de tráfico en Internet. Sumado a la cantidad de

usuarios, también existe una gran variedad de redes sociales con diferentes prestaciones, y por ende exigencias sobre la red. Existen redes sociales de bajo impacto en el tráfico, ya que su contenido es texto, redes sociales laborales, de video, de transmisión donde se generan transmisiones en vivo, etc.

Otro fenómeno que se consolidó durante la pasada década es la proliferación de rentar grandes capacidades computacionales, de alta disponibilidad y a bajo precio. Esta aparición fue gracias al desarrollo de datacenters, alrededor del mundo donde se alojan miles de dispositivos, los cuales luego se administran y retan a quienes requieran esta capacidad computacional. El éxito de estas infraestructuras no es sólo su relativamente bajo costo de alquiler, sino la facilidad con la cual los arrendatarios pueden hacer uso y administración de las mismas.

Estas nuevas tendencias en el uso de Internet ha generado una reconfiguración de su tráfico; lo que a su vez ha llevado a que la infraestructura se adapte de manera tal de poder satisfacer las calidades de servicio que requiere los nuevos contenidos. Para cumplir tal requerimiento, en los últimos años han proliferado las Content Delivery Networks (CDN), que son una solución arquitectónica para la distribución de contenidos de Internet.

Una CDN es una plataforma distribuida, la cual tiene la finalidad de acercar el contenido a los usuarios. Para entender la solución que proponen las CDN propongamos el escenario contrapuesto. Supongamos un único servidor, el cual contiene la totalidad de los videos de la plataforma; y esta plataforma cuenta con millones de usuarios, quienes están distribuidos por todo el mundo. Este escenario presenta tres severas limitaciones.

La primera limitación se debe al tráfico, medido en bytes, que intercambiará este servidor. El nivel será extremadamente elevado haciendo que pueda inducir una congestión no deseada, o incluso la capacidad de los medios físicos sea insuficiente para cumplir tal fin. Para este último caso, pensemos en el caso de YouTube donde los usuarios son miles de millones.

La segunda limitación se debe a la latencia, que es una variable que expresa la demora (en unidad de tiempo) entre solicitar un recurso (por ejemplo una foto) y finalmente obtener dicha petición. Dado que Internet es un sistema de comunicaciones, hay que contemplar las restricciones electromagnéticas a las cuales está sujeto el intercambio de información. Por ejemplo, si el servidor de video se encuentra en San Francisco, California y el usuario que desea consumir dicho contenido se encuentra en la Ciudad de Buenos Aires, Argentina, la petición demorará al menos, tiempo que la onda electromagnética necesita para cubrir la distancia entre ambas ciudades, de ida y vuelta. Cuando las distancias son tan extensas como la recientemente descrita, la latencia afecta negativamente a la experiencia de usuario.

La tercera limitación se debe a la robustez de la plataforma dado que ésta tendrá un único punto de falla. Aunque sería sencillo tener servidores alternativos en caso de falla, si todo el tráfico ingresa o egresa por un único punto, este también será un punto crítico de la infraestructura.

Entonces, con el fin de sortear las limitaciones recientemente mencionadas, las CDN son plataformas con múltiples puntos de presencia, geográficamente distribuidos, en los cuales se almacenan copias de los contenidos más populares. De esta manera, múltiples sitios con una réplica de la información, las peticiones se distribuirán a lo largo de las réplicas en lugar

de concurrir todas en el datacenter principal. Además, dado que ahora la información se encuentra distribuida, la distancia entre los usuarios y los servidores es menor, por lo tanto la latencia disminuye. Por último, la plataforma distribuida tiene múltiples puntos de salida de tráfico, por lo cual desaparece cualquier sospecha de congestión por saturación de la infraestructura.

Las CDN no son implementaciones propietarias, ni equipos específicos, sino que la palabra representa a un concepto que engloba una técnica para distribución de información. Estas plataformas reducen en efecto potenciales detrimentos de la calidad de Internet, sin embargo, el hecho de desplegar y operar una plataforma distribuida implica altos costos, que sólo un escaso número de participantes puede afrontar. Por lo tanto, son escasas aunque populares, las organizaciones que han desplegado sus CDN, tal como Apple, Google, Facebook, Netflix y Amazon. También existen otras organizaciones que cuentan con CDN sin ser generadores de contenidos, tal como Akamai y LimeLight. El negocio de estas últimas empresas es proveer el servicio de CDN a aquellas corporaciones que no pueden solventar el despliegue de una CDN, pero aún así están interesadas en sus bondades. Un ejemplo es la aplicación de mensajería Slack ó Spotify.

Desde el punto de vista BGP, el interés de las CDN surge de estudiar la reconfiguración de la interconexión. Dado que las CDN buscan servir el tráfico con baja latencia y por medio de enlaces no congestionados, los Sistemas Autónomos de los proveedores de contenido que disponen de una CDN buscan eliminar el uso de intermediarios para distribuir el tráfico. Entonces, las CDN han desarrollado una extensa infraestructura de manera tal de contar con los medios físicos para celebrar un acuerdo entre pares con el resto de las organizaciones. Esto significa para los proveedores de servicio de Internet (ISPs) poder acceder a contenido popular para sus usuarios a costo nulo. Por otra parte, los proveedores de contenido se han conformado como miembros de los IXPs. A través de estas entidades, los proveedores de contenido pueden acceder simultáneamente a varios AS por medio de un único medio físico, lo cual reduce significativamente el costo de su despliegue.

Ante la proliferación de las CDN, el desafío científico pasar por detectar la presencia de CDN, identificarlas y evaluar la agresividad de su despliegue. También aquí, es necesario crear herramientas para los operadores de Internet, de manera tal que puedan saber de antemano cuales son los proveedores de contenido que están desplegando sus CDN. De esta manera los propietarios y administradores de Sistemas Autónomos podrán crear soluciones proactivas ante servicios que están en camino a consolidarse.

5. Conclusiones

La pila de protocolos TCP/IP se ha consolidado a lo largo de los años, y dado su flexibilidad y simplicidad ha permitido que se incorporen miles de millones de dispositivos con fines sumamente diversos. A pesar de que existen cambios permanentes en la fisonomías de Internet, el ecosistema de organizaciones independientes que operan en Internet continúan interactuando por medio del protocolo BGP. El presente trabajo ha presentado algunas de las cuestiones claves que estudiamos para poder comprender el funcionamiento de Internet, en función de los cambios en la dinámica su ecosistema; y donde aún queda un vasto campo de investigación.

8

Sistemas de control para plantas con retardos variables

Griselda I. Cistac¹, Aníbal Zanini²

¹ Facultad de Ingeniería- UNLPam

² Facultad de Ingeniería -UBA2

Resumen

El análisis de retardos temporales en una estructura de control es un tema que preocupa tanto a investigadores como usuarios ya que es frecuente encontrar procesos con este tipo de dinámicas en procesos industriales. La importancia de los retardos en la estructura de control es que provocan dificultades a la hora de definir una estrategia de control pues existe una falta de sincronismo entre la acción de control y su efecto sobre el proceso. A su vez la presencia del retardo los hace más propensos a la inestabilidad. Existen estrategias para controlar procesos con retardos conocidos y fijos, pero en retardos desconocidos y variables el tema no está cerrado. En un principio el algoritmo de identificación del modelo de la planta térmica piloto partía del conocimiento del retardo y recibía la cantidad de coeficientes a identificar (numerador y denominador de la función transferencia) pero el valor del retardo era fijo y conocido. Con esa identificación se desarrolló el algoritmo de control utilizando un Predictor de Smith (con los modelos identificados) sintonizando un controlador PI según la técnica IMC (Internal Model Control). En el paso siguiente que se presenta aquí, el algoritmo de identificación recibe no sólo la cantidad de coeficientes del numerador y denominador de la función transferencia, sino un valor máximo asociado al retardo desconocido. El algoritmo diseñado posibilita realizar la identificación tanto off line como on line. A su vez se decidió incorporar un parámetro que posibilita habilitar o deshabilitar la identificación on line que es decidida cuando los coeficientes identificados han convergido ya que los valores obtenidos brindan una función transferencia adecuada (identificados todos sus parámetros: numerador, denominador y retardo).

Introducción

El análisis de retardos temporales en una estructura de control es un tema que preocupa tanto a investigadores como usuarios ya que es frecuente encontrar procesos con este tipo de dinámicas en procesos industriales. El retardo o tiempo muerto puede encontrarse

debido a las demoras que son provocadas por el transporte de materia o energía, ubicación de los sensores, al propio método de sensado en la navegación espacial debido a las distancias que debe recorrer cualquier comunicación por enumerar algunas. A su vez se debe tener presente que los retardos suelen depender de las condiciones operativas lo que determina que los mismos pueden ser variables. El retardo puede relacionarse con el tiempo que le lleva a la variable de salida (variable que deseo controlar) variar asociando este nuevo valor al que debe producirse por el cambio en la acción de control.

Uno puede preguntarse ¿por qué los retardos temporales son problemáticos en un sistema de control que necesiten ser estudiados?. Algunas de las particularidades que se presentan en sistemas con retardos es que: provocan muchas dificultades a la hora de definir una estrategia de control, degradan el comportamiento del sistema debido a una falta de sincronismo entre la acción de control y su efecto sobre el proceso, parámetros asociados a la estabilidad del sistema como Márgenes de Fase y de Ganancia se degradan haciendo que el sistema realimentado sea más propenso a la inestabilidad entre otros.

La idea inicial para el tratamiento de retardos, y que aún sigue vigente en las más recientes investigaciones, es la de “predecir” los valores que tomarán las variables de interés luego del retardo. En el año 1957 el Dr. Otto Smith fue quien presentó una solución para plantas con retardo temporal o tiempo muerto dando origen a lo que se conoce como el “Predictor de Smith (PS)” iniciando el camino para superar los inconvenientes ocasionados por retardos conocidos y constantes. Su propuesta fue diseñar un regulador para el proceso sin retardo y lograr esa misma performance mediante la implementación del PS. Su propuesta sigue siendo quizás la más conocida y utilizada en la práctica ya que permite continuar utilizando controladores clásicos (PIDs) sin pérdida de calidad en el control. El primer controlador predictivos de este tipo es el conocido como PS. Se debe tener presente que si bien los controladores de tiempo muerto aparecen a mediados de los 50 su implementación, mediante electrónica analógica, se hacía muy difícil para su aplicación en la industria hasta la irrupción de las computadoras digitales. Con el control digital ya no existe límite en la complejidad del algoritmo, se dispone de exactitud y estabilidad en el cálculo entre algunas de las ventajas por lo que en la actualidad puede considerarse impensable implementar un lazo de control sin un elemento digital de cálculo y el controlador PS se torna un controlador muy utilizado y eficaz.

Si bien existen estrategias de control teniendo en cuenta la existencia de retardos constantes utilizando el PS su implementación parte del conocimiento del modelo lo cual incluye conocer el retardo y considerarlo constante. El enfoque de esta tesis (Sistemas de Control para Plantas con Retardos Variables) se centra en identificar retardos variables adaptando la estrategia de control a estos cambios.

Desarrollo

Para poder hacer hincapié en los problemas de implementación que surgen al aplicar las técnicas de control en procesos industriales se diseñó y construyó una planta térmica piloto cuyo esquema es el de la Figura 1.

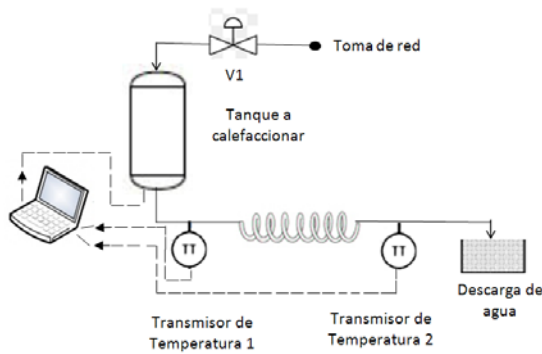


Figura 1

La planta consiste en un tanque en donde se calienta un líquido siendo la variable a controlar la temperatura dentro del recipiente y el punto de medición es el “Transmisor de Temperatura 2”, es decir que se presenta un retardo debido al tiempo que tarda el líquido en llegar desde el tanque hasta el sensor. Este tiempo, a su vez, es función del caudal y la medición identificada como “Transmisor de Temperatura 1” es sólo como referencia. La energía para la calefacción es entregada a través de una resistencia eléctrica y se varía mediante una modulación de ancho de pulso (PWM) que permite simplificar el diseño del actuador. El control de la planta se realiza mediante un computador personal.

Esta etapa incluye un paso previo al control que consiste en el modelado dinámico del proceso y para ello se utilizan técnicas de identificación por mínimos cuadrados, mínimos cuadrados recursivos (donde el planteo es utilizar para la estimación de parámetros en el instante k a partir de los valores anteriores estimados anteriormente) y mínimos cuadrados con factor de olvido pues en el algoritmo recursivo las muestras muy viejas y las nuevas tiene el mismo peso lo cual puede producir inconvenientes si hay cambios en los parámetros, puede que el vector de los coeficientes identificados no converja al nuevo valor por eso se incorpora el factor de olvido.

En cualquiera de los procesos de identificación mencionados, es necesario cumplir las condiciones de excitación persistente y disponer de un número suficiente de muestras. En los algoritmos de diseño conocidos está implícito que el valor del retardo es constante y conocido por lo que la identificación se focaliza en los coeficientes \hat{a}_i y \hat{b}_i con lo cual se definirá la función transferencia. En esta tesis el algoritmo de identificación debía además de identificar los coeficientes mencionados el valor n_k que es el asociado al retardo. Para llevar a cabo la identificación es necesario ingresar la cantidad de coeficientes \hat{a}_i que es identificada con n_a , \hat{b}_i con n_b , y para saber el valor del retardo se ingresa el valor de una cota máxima asociada al valor del retardo identificado con n_k .

El algoritmo de identificación involucra la condición de excitabilidad del proceso, en un proceso con retardos importantes era necesario determinar un parámetro que garantizara dicha condición pues hay que tener presente la falta de sincronismo entre la acción de control y su efecto sobre el proceso. La condición de excitabilidad puede interpretarse como la de excitar todos los autovalores de modo de poder identificar la dinámica del mismo. Para lograr esa condición se decidió ensayar diferentes estrategias utilizando: el cálculo del Número de condición y la traza ambos de la Matriz de Covariancia del algoritmo de mínimos

cuadrados recursivo con y sin factor de olvido, el cálculo del Número de Condición de la Matriz de Covarianza (C_{uu}) de la excitación.

A su vez teniendo en cuenta que el proceso de identificación puede llevarse a cabo de manera off line u on line se decidió poder determinar en el caso de identificaciones on line la posibilidad de habilitar o deshabilitar la identificación. Cuando se plantea deshabilitar la identificación es porque el modelo obtenido se considera el adecuado, pues los parámetros han convergido y continuar identificando on line no aporta al modelo. Sobre las tres estrategias mencionadas anteriormente se trabajó de modo de definir cuál de ellas garantizaba identificar adecuadamente la planta on line. Una característica presente en los tres casos es que sus valores crecen rápidamente a valores que tienden a infinito cuando el sistema ya se halla excitado. Ese crecimiento en el caso de un sistema con retardo pequeño puede ser el único a considerar para habilitar o no la identificación pero en el caso de retardos grandes o desconocidos fue necesario incorporar otro parámetro. Se realizaron simulaciones sobre las tres propuestas para evaluar las bondades de cada una de ellas de modo de definir la adecuada.

Resultados

Para proceder a la identificación de la planta piloto se utilizó una entrada de control del tipo escalón en 3 etapas aumentando su valor en distintos tramos. La curva de calentamiento obtenida de la variable de salida y la variación de la etapa de potencia de la acción de control se muestra en la de la Fig. 2

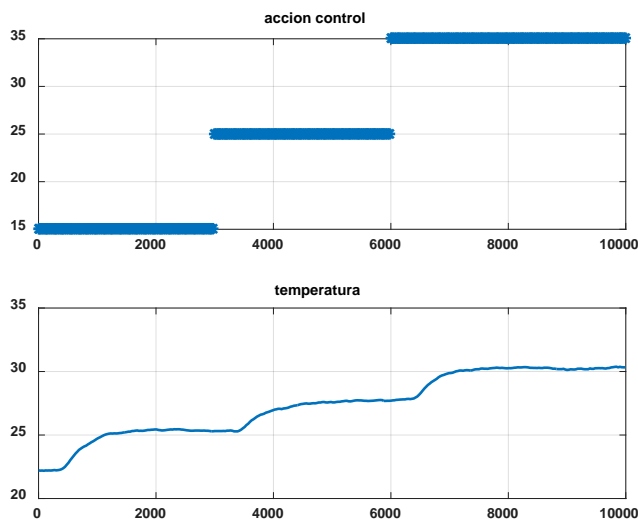


Figura 2

Durante la etapa de identificación se desconoce el valor exacto del retardo por lo tanto se ingresó un valor que es la cota máxima que puede tener el mismo y el algoritmo identifica el valor correcto dentro de esa cota además de los distintos coeficientes del vector $\hat{\theta}_k$ instante a instante.

En una primera instancia para cerrar el control del lazo se utiliza como controlador uno del tipo PID (sumamente popular y conocido en la industria) en una estructura con el Predictor de Smith. Los controladores PID necesitan los siguientes parámetros definidos como: Ganancia proporcional, Tiempo Integral y Tiempo. Para la sintonía del controlador se utilizaron técnicas IMC (Internal Model Control) para implementar un controlador del tipo PI el que es obtenido a partir de un PID. Para llevar a cabo la sintonía del PID y utilizar el PS dentro del lazo de control es necesario conocer el modelo instante cuyos parámetros se obtienen a instante a instante mediante el algoritmo de identificación.

En esta primera etapa el modelo elegido para controlar la planta piloto está dado por la siguiente función transferencia:

$$G(z) = \frac{b z^{-1}}{1 - a z^{-1}} z^{-nk}$$

Teniendo presente que se desea obtener la función transferencia instante a instante para poder controlar, el algoritmo además de identificar todos los parámetros debe presentar como salida los coeficientes de la función transferencia involucrados es decir los valores a, b, n_k .

En la Figura 3 se presenta de manera esquemática y compacta el algoritmo que realiza tanto la identificación como la obtención de los coeficientes de la función transferencia.

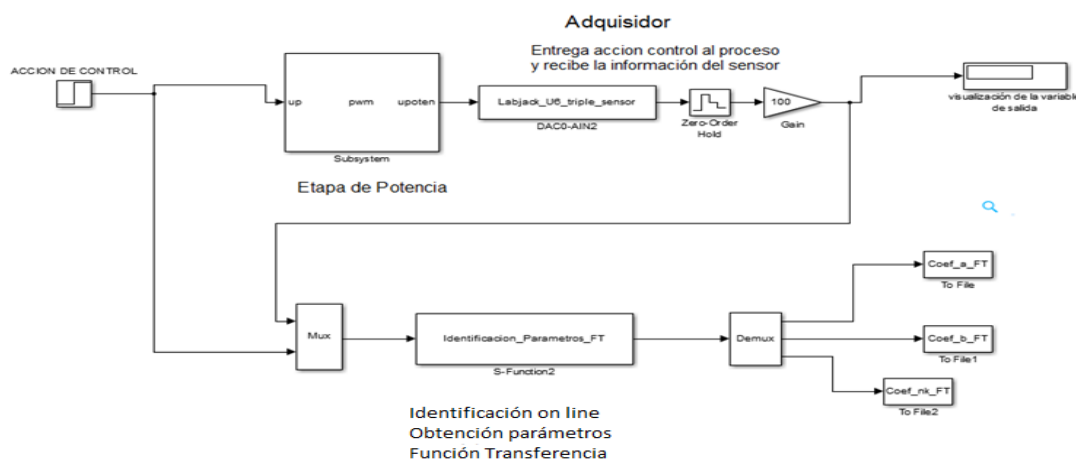


Figura 3

Se realizaron ensayos para una identificación fuera de línea tomando todos los valores obtenidos de modo de poder comparar que ocurría cuando se decidía deshabilitar la identificación pues se consideraba que los parámetros habían convergido. De las comparaciones entre las tres propuestas del parámetro que habilitara/deshabilitara la identificación los mejores resultados se obtuvieron utilizando el número de condición de la Matriz de Covarianza C_{uu} de la excitación.

En la Figura 4 se presenta la identificación obtenida utilizando todos los valores.

$$G_1(z) = \frac{0.01597 z^{-1}}{1 - 0.9264 z^{-1}} z^{-16}$$

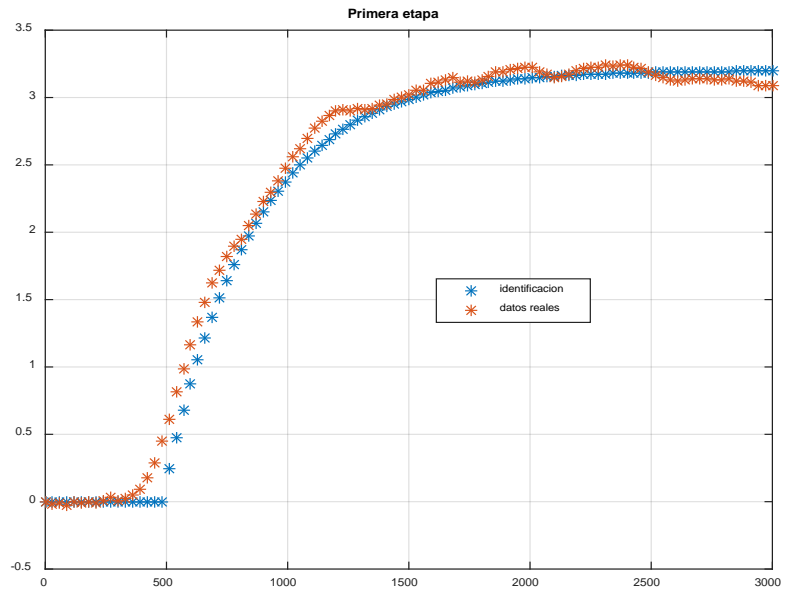
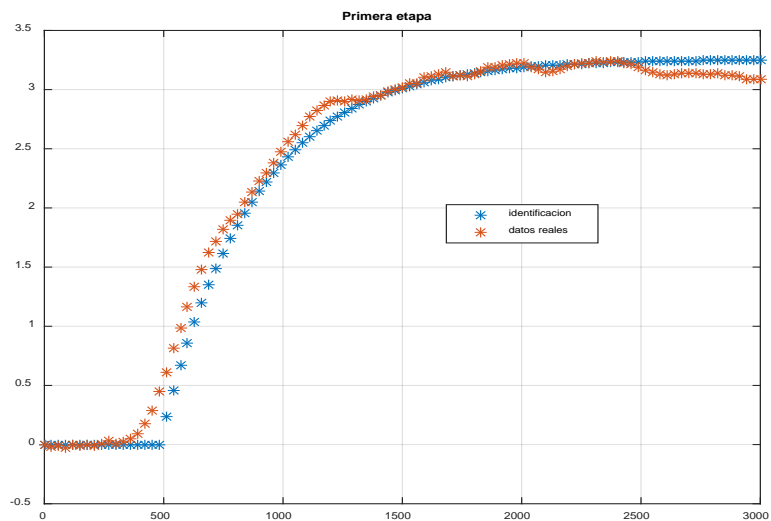


Figura 4

En la Figura 5 se presenta la identificación obtenida al deshabilitar la identificación pues se consideraba que los valores habían convergido.

$$G_1(z) = \frac{0.01636 z^{-1}}{1 - 0.9233 z^{-1}} z^{-16}$$



Conclusiones

El algoritmo de identificación planteado parte del desconocimiento del valor exacto del retardo pero se conoce una cota máxima del mismo. El algoritmo en esta primera instancia entrega una función transferencia de primer orden con retardo para comenzar con la implementación sobre la planta. A su vez posibilita la identificación tanto fuera de línea como en línea pudiendo decidir si se desea identificar en todo momento o si se desea deshabilitar la identificación al aceptarse como adecuado el modelo al que se ha arribado. Se considera que los resultados obtenidos son satisfactorios al compararlos con los datos reales.

Trabajo Futuro

Una vez identificado la variación del retardo o el retardo mismo se adaptará la ley de control. Para ello se está trabajando en el algoritmo que define la estructura del PS a partir de la identificación on line de la Función Transferencia y a partir de ellos se obtienen on line los parámetros del PI (utilizando el método IMC). Se propondrán diferentes funciones transferencias de los modelos como distintos algoritmos de control y se compararán sus comportamientos y rangos de validez.

Bibliografía

Aström, Karl; Wittermark, Björn. Adaptive Control. Addison-Wesley Publishing Company Inc. 2da.Edición.

Aström, Karl; Wittermark, Björn. Computer-Controlled Systems. Theory and Design. Prentice Hall. Information and System Sciences Series. 3ra Edición.

Aström, Karl; Eykhoff Pieter. System Identification- A Survey. Automática, Vol.7, pp. 123-162. Pergamon Press. 1971

Benitez González, Ivón; Rivas Péres Raúl. Predictor de Smith :revisión y desafíos. RIELAC. Vol. XXXVIII 1/2017. pp.33-47. Enero

Goodwin, Graham; Sang Sin; Kwai. Adaptive Fitting Prediction and Control. Dover Publications, Inc. 2009

Majd Aldin; Najafi; Marzieh, Kamali; Javad, Askari. Parametric Identification of Input Delay Systems with Unkwon time Delay. Proccedings of 26 Chinese Control Conference . pp. 246-250. Julio. 2007

Normey Rico, Julio; Camacho Eduardo. Control of Dead time Processes. Springer. 2007

Normey Rico, Julio., Camacho, Eduardo.(1998). Dead Time compensators: A unified approach. Proceedings of IFAC-LCDDT's 98. Grenoble- France. 141-146.

Ren X; Rad, A; Chan, P; Lo, W. On Line Identification of Continous Time Systems with unkwon time delay. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 50 N°9, Septiembre. 2005

9

Control tolerante a fallas en vehículos aéreos no tripulados

Claudio Daniel Pose

Grupo de Procesamiento de Señales, Identificación y Control. Dpto. de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires - Buenos Aires, Argentina.

Introducción

Los recientes avances en la robótica móvil han hecho crecer enormemente la investigación y desarrollo de los vehículos aéreos no tripulados (UAVs por sus siglas en inglés). A un ritmo constante, los vehículos aéreos no tripulados, semiautónomos y completamente autónomos, están comenzando a reemplazar a los sistemas tripulados en diferentes aplicaciones, donde sea necesario realizar tareas repetitivas y/o peligrosas.

En los últimos años, los micro UAV (mUAV), en particular los del tipo multirrotor, han ganado gran popularidad, debido a su disponibilidad y costo moderado. Se necesita poca o ninguna experiencia para volarlos. Muy a menudo, una persona con poco conocimiento de los riesgos involucrados es capaz de operar libremente un mUAV multirrotor. Las aplicaciones no se limitan a meras actividades recreativas, sino que han crecido dentro de industrias como la publicidad o el cine, donde los pilotos profesionales hacen uso de este tipo de vehículos. Si bien estos usuarios experimentados pueden haber tomado todas las precauciones posibles, aún son vulnerables a fallas debido a un mal funcionamiento de cualquier componente del vehículo, o circunstancias imprevistas durante un vuelo.

Como consecuencia, en los últimos años han aparecido múltiples investigaciones que tratan diferentes tipos de fallas en este tipo de vehículos. La mayoría de los temas abordan temas relacionados con redundancias de sensores y actuadores, y fallas totales y parciales en los actuadores.

Este trabajo de doctorado ha abordado, hasta la fecha, el problema de la detección, el aislamiento y la corrección de una falla total del motor para un multirrotor de tipo hexacóptero. El objetivo final del mismo es obtener un vehículo multirrotor con la mayor tolerancia a distintos tipos de falla posible.

Bases teóricas de la tolerancia a fallas

Como es ampliamente conocido, para los multirrotores es posible realizar maniobras de control de altitud y actitud mediante el comando independiente de la velocidad de los motores del vehículo. Los vehículos multirrotor presentan varias ventajas para todo tipo de usuarios y aplicaciones, ya que son capaces de despegar verticalmente y mantener la posición en el aire.

Para un diseño multirrotor estándar, donde los motores se distribuyen de manera equidistante en una circunferencia en el plano XY apuntando hacia arriba, se ha demostrado que una pérdida total de un motor causa la pérdida de control de un grado de libertad. En estos casos, suele ser el control de heading (yaw) el que normalmente se elige para perder, ya que, de esta manera, al menos el vehículo puede mantener la posición, mientras que el cabeceo (pitch), alabeo (roll) y la altitud pueden ser controlados.

Se ha demostrado teóricamente que un hexarotor en forma de hexágono donde los ejes de rotación de todos los motores están inclinados simétricamente hacia el eje vertical del vehículo, debería ser en la práctica capaz de mantener el control independientemente en actitud y altura, en caso de falla completa en uno de sus motores. Se define a efectos de este trabajo, la tolerancia a fallas como la capacidad de mantener el control sobre todos los grados de libertad, en el caso que ocurriese una falla, en particular una falla total de un actuador.

La figura 1 muestra un vehículo multirrotor, con la numeración de los motores, su ubicación, la inclinación y la dirección de rotación para el hexacóptero de rotores inclinados propuesto.

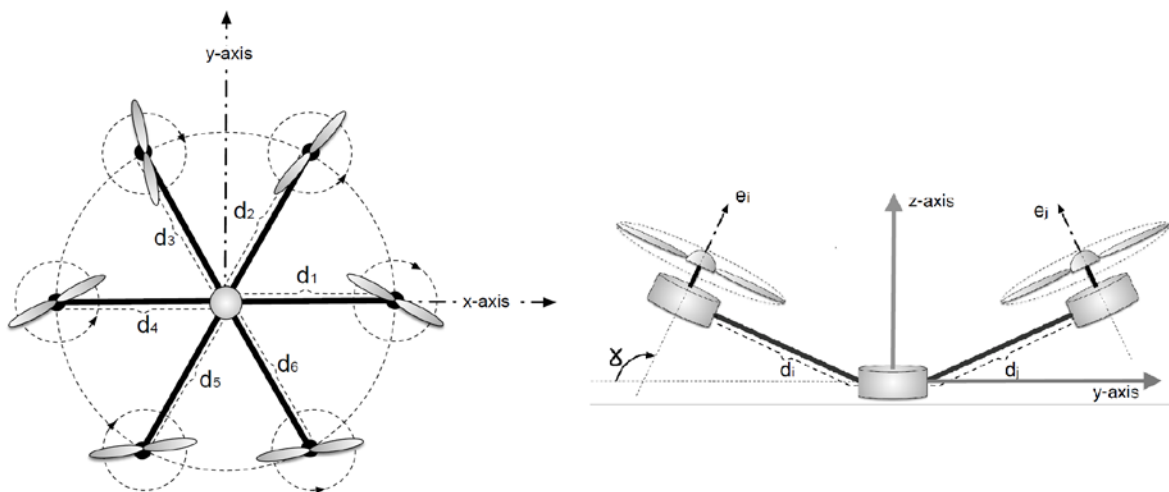


Figura 1: Vista superior (izquierda) y lateral (derecha) de la estructura de un hexarotor.

Cada motor ejerce una fuerza $f_i \in [0, F_M]$. En la práctica, cada motor se comanda a través de una señal modulada por ancho de pulso (PWM) u_i , que va de 0 a 100%. Cerca del punto de operación nominal, se supone una relación lineal entre la señal PWM y la fuerza ejercida, con $f_i = k_f u_i$. También se considera que cada motor ejerce un torque sobre su eje de giro

según su dirección de rotación, $m_i = (-1)^i k_t u_i$. Las constantes k_f y k_t , suelen establecerse experimentalmente. Además, se define la constante $k_t = k_t/k_f$, para ser utilizada luego en ecuaciones más compactas. La longitud del brazo, medida desde el centro del vehículo hasta el eje del motor a lo largo del brazo, se denota $l = d_i, i = 1, \dots, 6$.

Como se mencionó anteriormente, al inclinar los rotores en un ángulo γ , se puede lograr un control tolerante a fallas sin perder el control ni en posición ni en la dirección vertical (empuje), incluso con un motor defectuoso en falla total. Para simplificar la notación, se define un parámetro α de la siguiente manera:

$$\alpha = \alpha(\gamma) = \frac{k_t}{\sqrt{3}l \tan(\gamma)}$$

Se ha demostrado que si este parámetro se elige de tal manera que $0 < \alpha < 1$, es posible lograr la tolerancia a fallas. Sin embargo, si $\alpha = 1$, $\alpha = 0(\gamma = \pi/2)$, entonces el hexarotor no es completamente controlable si falla un rotor. En lo que sigue, se supone que $0 < \alpha < 1$.

Se definen M_x, M_y, M_z como los torques ejercidos en los tres ejes por las fuerzas de los motores del vehículo, y a F_z como la fuerza resultante ejercida en el eje Z del vehículo. Cuando todos los motores funcionan correctamente, la relación entre el vector de torques y fuerzas $[M_x, M_y, M_z, F_z]^T$, y el vector de fuerzas de los motores f , viene dado por la siguiente ecuación:

$$[M_x, M_y, M_z, F_z]^T = A(\alpha, \gamma) \cdot f$$

La matriz $A(\alpha, \gamma) \in R^{4 \times 6}$ es una matriz fija, definida por los parámetros físicos del vehículo, su geometría y las características de los motores.

El problema a estudiar consiste en resolver el siguiente problema inverso: dado un set de fuerzas y torques deseados $[M_x, M_y, M_z, F_z]^T$, se desea encontrar $f \in R^6$ que resuelve la dicha ecuación. Como se indicó anteriormente, para que sea válida, una solución debe ser un vector estrictamente positivo, ya que la fuerza que los motores pueden ejercer es sólo en una dirección. Además, el módulo de fuerzas debe ser inferior al empuje máximo que pueden generar los motores, es decir, $f_i \in [0, F_M], i = 1, \dots, 6$. Tiene sentido concentrarse en la positividad de $f \in R^6$, ya que esta es la razón por la que el hexacóptero estándar no es tolerante a fallas.

La solución más común y de uso frecuente para la ecuación presentada se basa en la pseudoinversa de Moore-Penrose, ya que otorga la solución de mínima norma y, en consecuencia, minimiza la fuerza necesaria de los motores. Sin embargo, se ha demostrado también que la pseudoinversa de Moore-Penrose no siempre es la mejor alternativa, ya que a veces brinda soluciones que no satisfacen las restricciones de fuerzas.

Desarrollo del hardware necesario

Dado que existe una gran variedad de controladoras de vuelo en el mercado, pero no muchos de ellos proporcionan acceso de bajo nivel al código, se ha optado por diseñar un modelo propio, que sea fácil de modificar y adaptar a las necesidades de los experimentos.

En la figura 2 se muestra la computadora de vuelo actualmente en uso, denominada Choriboard, que es la segunda versión producida. Se basa en el microcontrolador LPC-1769, un ARM Cortex M3 que funciona a 120 MHz y varios sensores como la unidad de medición inercial MPU-6000, la brújula digital HMC5883L y el barómetro BMP180, permite enviar información de vuelo a MATLAB (para análisis de datos) a través de una conexión inalámbrica XBee de 115200 bps. El lazo de control se ejecuta a 200 Hz, donde se estiman los ángulos de navegación, y un algoritmo de control PID calcula los torques y fuerzas necesarios para la estabilización del vehículo.

Una tercera iteración de esta placa, más pequeña y liviana, ya se ha fabricado y actualmente se está siendo evaluada.

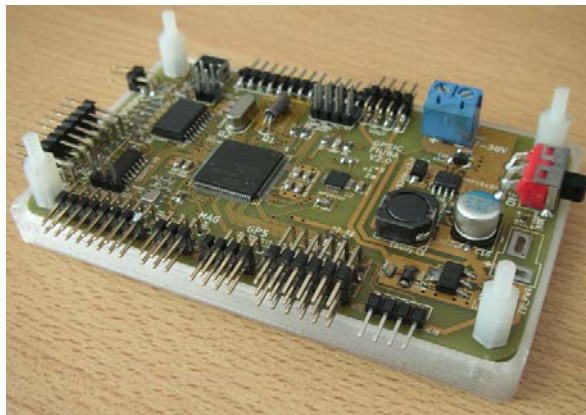


Figura 2: Controladora de vuelo Choriboard v2.

Al mismo tiempo, los hexacópteros disponibles en el mercado no suelen tener brazos inclinados (o motores), excepto algunos modelos específicos. Como el ángulo de inclinación no debería ser fijo, sino que debería permitir probar diferentes posibilidades, la decisión fue la de utilizar un modelo estándar que fuera fácilmente modificable.

La estructura elegida es la del DJI-F550, con una distancia máxima entre motores de 550 mm. Los actuadores instalados en este vehículo son motores T-Motor 2212-920KV, con hélices de plástico 9545 autoajustables, accionadas por controladores de velocidad electrónicos 20A (ESC). Como esta estructura solo permite montar los motores apuntando hacia arriba, se fabricó en una impresora 3D un adaptador mecánico para lograr la configuración del motor inclinado, mientras que la distancia desde el motor hasta el centro de masa sigue siendo la misma. La batería utilizada es una LiPo 4S 5000mAh 20C (14.8V) que permite aproximadamente 15 minutos de vuelo (sin fallas).

En la figura 3, se presenta la estructura modificada (izquierda) contra la estándar (derecha).



Figura 3: Estructura modificada y estándar de un hexarotor.

Resultados experimentales

Para probar las ventajas del hexacóptero con motor inclinado propuesto en comparación con la distribución estándar, se llevó a cabo un experimento utilizando las dos estructuras. Este experimento considera una falla parcial en uno de los motores, que está presente en el momento del despegue, o se produce en pleno vuelo, utilizando un interruptor en el control remoto. Este experimento no aborda la detección de la falla, sino sólo el comportamiento cuando se produce la misma.

Los resultados de este experimento se muestran en las figura 4. En ambos cuadros se representa la actitud de referencia y la medida en los ejes X e Y, correspondiendo el superior al vehículo estándar y el inferior al modificado. Cuando se aplica la falla alrededor de los 45 segundos, el vehículo estándar satura el motor 2 casi instantáneamente, pierde estabilidad y se estrella en el suelo. El vehículo modificado, en cambio, reacciona rápidamente, oscilando durante un corto período de tiempo y estabilizándose nuevamente. Finalmente, a los 54 segundos, la falla se desactiva y luego el vehículo aterriza de manera segura.

Para proporcionar una prueba experimental para sobre la tolerancia a fallas en caso de una falla total, se realizó una nueva prueba en la que el vehículo con motores inclinados tiene una falla de este tipo en el motor 2. Estos experimentos se realizaron con este motor siempre apagado, por lo que, nuevamente, aquí no se aborda la detección e identificación de la falla.

El vehículo pudo despegar, realizar un vuelo de alrededor de dos minutos y aterrizar de manera segura. En la figura 5, se muestran la actitud de referencia y la medida en los ejes X e Y de una parte del vuelo, durante diferentes maniobras, así como también en vuelo estacionario.

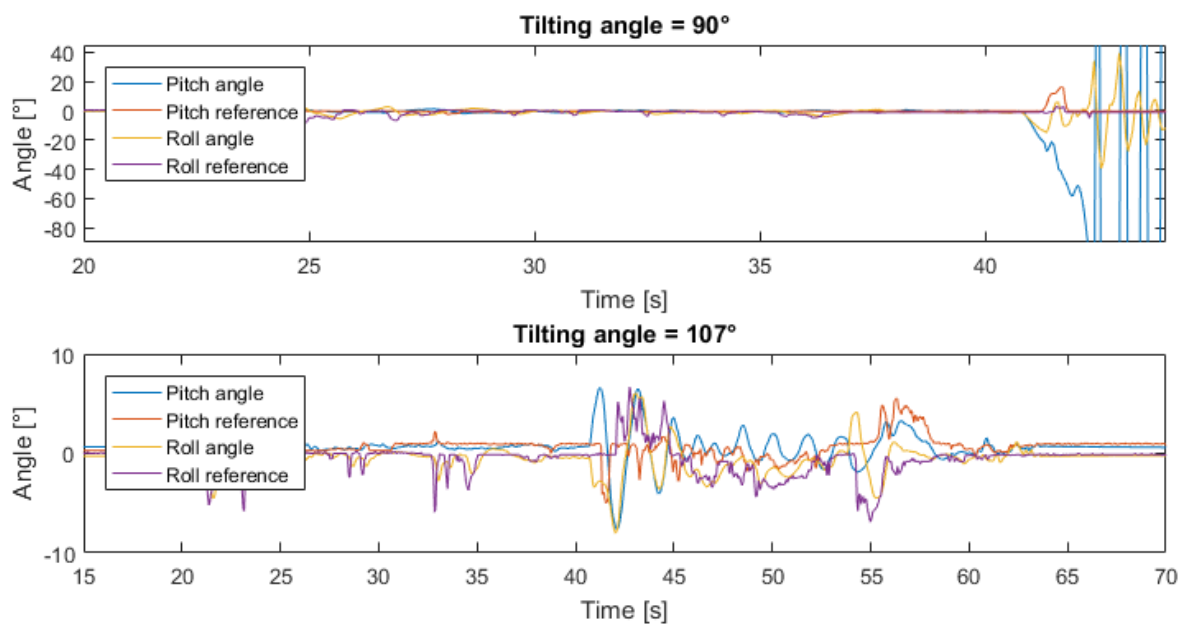


Figura 4: Falla parcial de un motor en vuelo para un hexacoptero estándar y uno modificado.

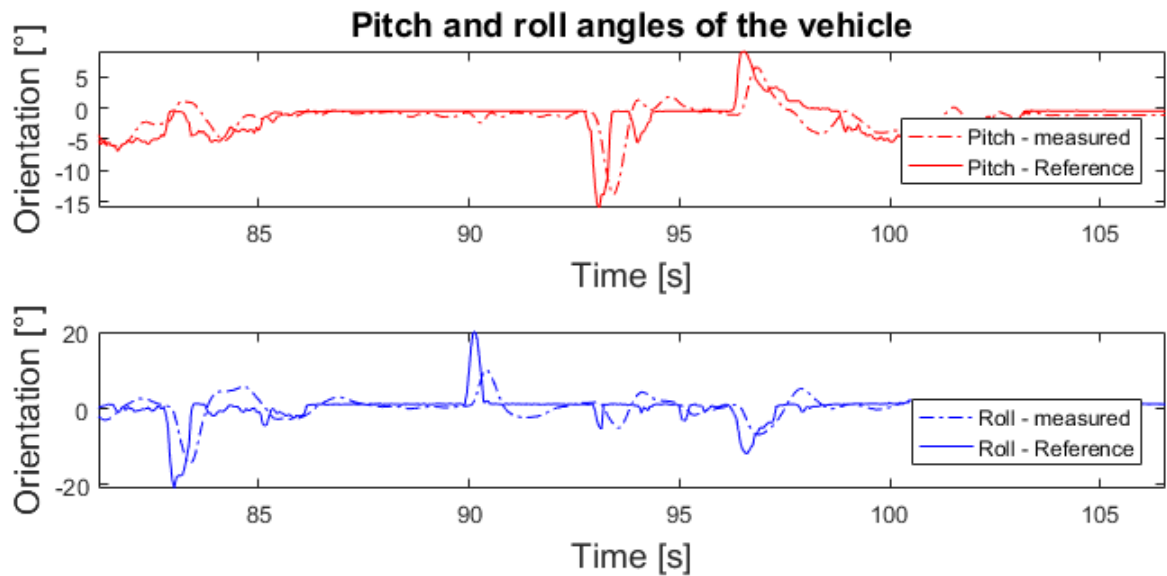


Figura 5: Orientación del hexarotor modificado en vuelo con una falla total en el motor 2.

Se puede observar que, durante el vuelo estacionario, el vehículo permanece casi inmóvil, oscilando alrededor del ángulo de referencia en promedio 2° . Este tipo de comportamiento es esperable mientras se vuela con un motor menos, pero sin embargo, el rendimiento estuvo por encima de las expectativas. Como referencia, el vehículo sin fallas en el vuelo estacionario se desvía de la referencia en no más de 0.5° . La respuesta a las maniobras también es muy buena, lo que demuestra que el vehículo puede volar (pero más restringido en cuanto a maniobrabilidad) con un motor menos.

Detección e identificación de fallas

Al momento de escribir este trabajo, se ha realizado una investigación que trata sobre la detección e identificación de una falla en cualquier motor, mediante el uso de aprendizaje estadístico.

En esta investigación, un clasificador estadístico se entrena utilizando datos de vuelo generados por un modelo de Simulink que se asemeja al comportamiento del vehículo real utilizado. El clasificador utiliza como entradas la actitud del vehículo y las señales comandadas a los motores (PWM), y calcula una variable por motor que indica su funcionamiento correcto o defectuoso.

El clasificador logra un buen desempeño, resultando en una detección de la falla en menos de 100 mS después de que haya ocurrido, con un alto rechazo de falsos positivos.

Referencias

- Valavanis K.P., Vachtsevanos G.J. (2015) "Future of Unmanned Aviation". in Valavanis K., Vachtsevanos G. (eds). Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer, Dordrecht
- M. Achteplik, K.M. Doth, D. Gurdan, and J. Stumpf, "{Design of a multi rotor MAV with regard to efficiency, dynamics and redundancy", in AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2012.
- Giribet, J. I., Sánchez-Peña, R., and Ghersin, A., "Analysis and design of a tilted rotor hexacopter for fault tolerance". IEEE - Trans. on Aerospace and Electronics Systems, 4, 52, 2016.
- Rajappa, S., Ryll, M., Bulthoff, H. H., and Franchi, A. "Modeling, Control and Design Optimization for a Fully-actuated Hexarotor Aerial Vehicle with Tilted Propellers". Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, Washington, 2015, pp. 4006–4013.
- C. D. Pose, J. I. Giribet and A. S. Ghersin, "Hexacopter fault tolerant actuator allocation analysis for optimal thrust", 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Miami, FL, USA, 2017, pp. 663-671. doi: 10.1109/ICUAS.2017.7991321
- J. I. Giribet, C. D. Pose and I. Mas, "Fault tolerant control of an hexacopter with a tilted-rotor configuration", 2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC), Mar del Plata, 2017, pp. 1-6. doi: 10.23919/RPIC.2017.8211624
- Juan I. Giribet, Claudio D. Pose, Alejandro S. Ghersin, and Ignacio Mas, "Experimental Validation of a Fault Tolerant Hexacopter with Tilted Rotors". International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications, Vol. 7, No. 2, pp. 58-65, January 2018. Doi: 10.18178/ijeetc.7.2.58-65
- A. Freddi, S. Longhi, A. Monteriù and M. Prist, "Actuator fault detection and isolation system for an hexacopter," 2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA), Senigallia, 2014, pp. 1-6. doi: 10.1109/MESA.2014.6935563
- C. Pose, A. Giusti and J. Giribet "Actuator fault detection in a hexacopter using machine learning", 26° Congreso Argentino de Control Automático, Noviembre, 2018
- Hexacopter flying with partial failure - <https://www.youtube.com/watch?v=YQwBmOfOd98>
- Tilted rotor hexacopter with total failure - <https://www.youtube.com/watch?v=iY64D7inSfw>
- Fault tolerant control for a tilted rotor hexacopter - <https://www.youtube.com/watch?v=a3-R2M5xWGA>

10

Estudio, Análisis y Desarrollo de Algoritmos de Consenso para Redes de Sensores Inalámbricos

Federico G. Zacchigna, Ariel Lutenberg y Fabian Vargas.

Laboratorio de Sistemas Embebidos (LSE)

Departamento de Electrónica

Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (FIUBA)

Resumen

En esta tesis de doctorado se estudian los algoritmos de consenso o estimación distribuida utilizados en redes de sensores inalámbricos. Es fundamental que estos algoritmos hagan un buen uso de la energía (o ancho de banda) ya que es un recurso limitado, para ello la censura de datos es una técnica que, bien implementada, permite cumplir con dicho requerimiento. Los objetivos de este trabajo son desarrollar algoritmos de consenso y estimación distribuida aptos para redes de sensores inalámbricos, que utilicen un mecanismo de censura que seleccione de manera inteligente los mensajes que se envían y los que no, basándose en la información disponible; y además brindar un método que permita encontrar el mecanismo de censura óptimo en cada caso. Los algoritmos desarrollados en este trabajo no están restringidos a una aplicación específica ya que pueden ser utilizados en distintos escenarios y son particularmente útiles cuando la energía o ancho de banda son recursos escasos.

1. Introducción

Las redes inalámbricas de sensores (WSN, del inglés, Wireless Sensor Network) son un conjunto de dispositivos autónomos, con capacidad de sensado, cómputo y comunicación. Los mismos están distribuidos geográficamente en un área de interés y su principal objetivo es extraer datos de algún proceso físico subyacente. Estos datos son procesados para luego reaccionar de alguna manera adecuada. Entre las aplicaciones de las WSN se destacan las militares, monitoreo y prevención de desastres naturales, monitoreo de industrias, monitoreo de estructuras, agricultura, domótica, meteorología, entre otras [1]. Para que los datos

recolectados sean útiles, es necesario resolver, según las necesidades de la aplicación, algunas de las siguientes problemáticas: la localización y sincronización de los nodos, enrutamiento de mensajes, recolección de energía y diversas cuestiones del procesamiento de señales, por ejemplo la detección de eventos y estimación de parámetros [1]. La problemática de interés en este trabajo es la estimación de parámetros, la cual se explicará con mayor detalle en la sección 2.

En la Fig. 1 se puede ver un esquema de la arquitectura de los nodos, o motes, de una WSN. Se distinguen cuatro componentes principales: sensores, unidad de procesamiento, radio y unidad de alimentación. Dadas algunas de las características habituales de los nodos y otras cuestiones de la aplicación, por ejemplo su bajo costo o la imposibilidad de acceso físico a los nodos, la energía de los mismos se vuelve un recurso escaso. Por esta razón es importante cuidar el consumo de energía de cada uno de sus componentes. En general la radio suele ser el componente que mayor energía demanda, por esto la reducción del uso de la radio se vuelve un factor fundamental en la vida útil de la red, cuando no es posible recargar las baterías de los nodos. El alto costo de la utilización de la radio implica tener que resolver las problemáticas antes mencionadas intercambiando la menor cantidad de mensajes posibles.

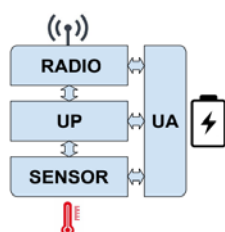


Fig. 1: Componentes de un mote WSN: Sensor, Unidad de Procesamiento (UP), radio, Unidad de Alimentación (UA).

Otra cuestión importante a tener en cuenta cuando se habla de WSN es la topología de la red, que puede ser, totalmente centralizada, totalmente distribuida, o una combinación de estas. La topología define diferentes cuestiones de la red, como por ejemplo la manera de intercambiar mensajes entre nodos, la energía necesaria para hacerlo, la conectividad, la robustez de la red, el área que puede abarcar la misma, etc [2]. Así mismo también es importante notar que distintas topologías representan distintos problemas a resolver.

2. Estimación y consenso distribuido

La estimación clásica busca encontrar el mejor estimador de algún parámetro que está oculto en las mediciones realizadas por los sensores. Matemáticamente, dado un conjunto de N nodos, se obtiene una medición de ellos que puede caracterizarse por un vector aleatorio, $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]$, con una función de distribución $f_X(x; \theta)$; a partir de una muestra x de ese vector aleatorio se desea estimar el parámetro oculto mediante $\hat{\theta} = f(x)$. El problema a resolver en la estimación clásica es encontrar la función f que mejor estima el parámetro oculto. Una posible respuesta sería encontrar la función f que minimiza el Error Cuadrático Medio (MSE, del inglés, Mean Squared Error):

$$MSE(\hat{\theta}) = \text{Var}(\hat{\theta}) + \text{bias}^2(\hat{\theta}) \quad (1)$$

La estimación distribuida también busca la función f que mejor estima el parámetro oculto, pero a diferencia de la estimación clásica, la elección de la mejor función tiene en cuenta las cuestiones relacionadas al entorno de una WSN, por ejemplo, por ejemplo la correlación espacial que existe en las mediciones, la comunicación *broadcast* inherente al canal inalámbrico, el costo energético de las tareas, como así también el del intercambio de mensajes o el procesamiento local (el realizado en los nodos). Algunas de las técnicas que se utilizan al hacer estimación distribuida son: preprocesamiento de los datos, cuantización de datos, selección de datos, selección de canal [3], censura de datos [4]. Esta última es una técnica que elige los mensajes a ser transmitidos en función de la información que éstos puedan aportar y es la técnica de interés en este trabajo, que será explicada con mayor detalle en la sección 3.

Por otro lado, el consenso se define de manera general como el proceso por el cual los nodos se ponen de acuerdo [2], normalmente en un valor, como por ejemplo pueden ponerse de acuerdo en cual es el máximo valor en la mediciones, el mínimo, el promedio, o cualquier otra función de la muestra inicial. En particular esta función de la muestra inicial puede ser la función f utilizada en la estimación distribuida. Entonces el consenso puede verse como un caso de estimación. Luego al hablar del consenso distribuido, éste agrega la limitación de que los nodos pueden intercambiar mensajes únicamente con sus nodos vecinos, es decir, aquellos con los que tienen conectividad. Es común hablar del consenso lineal distribuido, el cual es regido por la siguiente ecuación:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \sum_j w_{i,j} x_j(k) \quad (2)$$

con $w_{i,j} = 0$ si los nodos i y j no son vecinos. De esta manera el nodo i actualiza su valor considerando en el instante k , considerando los valores de los nodos i que pertenecen a su vecindario. Lo mismo puede ser representado de manera matricial como

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{P} \mathbf{x}(k) \quad (3)$$

Esta última ecuación define una iteración lineal. En el consenso distribuido el problema se basa en encontrar los mejores pesos $w_{i,j}$ o equivalentemente la matriz \mathbf{P} , que consiguen que cada elemento del vector \mathbf{x} converja al valor $f(\mathbf{x})$ lo más rápido posible, esto es con la menor cantidad de iteraciones posibles.

3. Censura de datos

Como se dijo anteriormente, la censura de datos es una técnica utilizada en la estimación (y detección también) distribuida, que tiene el fin de reducir la cantidad de datos intercambiados, lo cual significa un ahorro energético. La censura de datos se basa en medir la información que puede aportar un dato al resultado final, en este caso a la estimación del parámetro oculto, y luego, basándose en esa información decidir si vale la pena o no gastar esa energía para enviar el dato. Se vuelve necesaria una manera de medir la información de cada dato y contar con una Regla de Censura (CR, del inglés, Censoring Rule) que decida si el dato se transmite o se censura [5].

El origen de la censura se remonta a la detección distribuida, en donde el dato medido por los nodos pertenece a un conjunto prefijado de valores (usualmente dos) al cual se le sumaba el ruido propio de la medición [5]. En este caso en particular, al contar con buena información a priori del parámetro a ser estimado, resulta fácil diseñar una CR que consiga un ahorro de energía [6]. Posteriormente se extendió la utilización de la técnica de censura a casos de estimación (ya no detección) en los cuales se posee información a priori de la distribución del parámetro. En estos casos también es relativamente sencillo diseñar la CR utilizando esta información a priori, aunque el ahorro de energía que se alcanza está fuertemente limitado por la distribución a priori del parámetro [7]. La técnica de censura no puede ser utilizada si no se tiene conocimiento de la distribución inicial del parámetro, por eso en otros trabajos se propuso la idea de utilizar una fase inicial mediante la cual se estima la distribución a priori utilizando un subconjunto (despreciable) de las mediciones para obtener este conocimiento [4]. En esta situación también se vuelve simple el diseño de la CR. Este enfoque está fuertemente limitado a que el número de nodos sea grande.

En esta tesis de doctorado se propone la utilización de lo que llamamos una CR dinámica la cual se adapta a información lateral que se tiene disponible en cada momento. La información lateral está compuesta de dos elementos: los valores enviados por los nodos; y el de patrón de nodos que decidieron censurarlos. Es posible extraer información tanto de las mediciones que se enviaron, así como también se de aquellas censuradas. Se propone resolver el problema tanto para un esquema de estimación distribuida en una red centralizada, como para un esquema de consenso en una red distribuida.

4. Resultados publicados

El primer trabajo publicado presenta la caracterización de estimadores para distintos escenarios y estrategias heurísticas [8]. Particularmente se ha caracterizado el MSE de un algoritmo de consenso considerando distinto número de nodos, niveles de censura e incluyendo posibles fallas en los enlaces. En la Fig. 2 pueden verse los resultados.

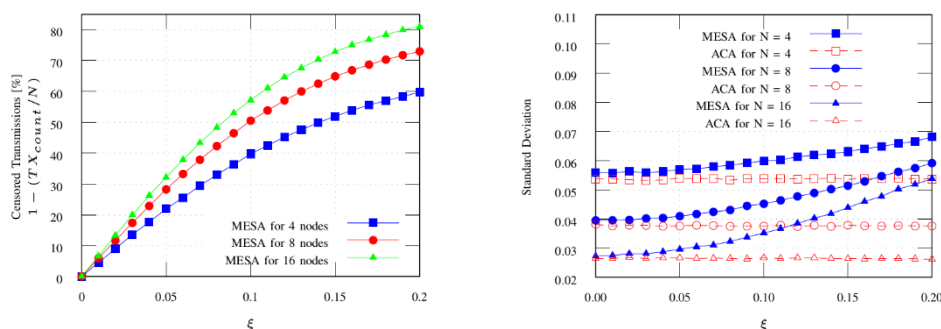


Fig. 2: Caracterización de algoritmos de consenso heurísticos.

Posteriormente se caracterizó un estimador en una red centralizada considerando distinto número de nodos y niveles de censura [9]. En este trabajo se decidió considerar enlaces ideales para simplificar el problema. Los resultados se pueden ver en la Fig. 3.

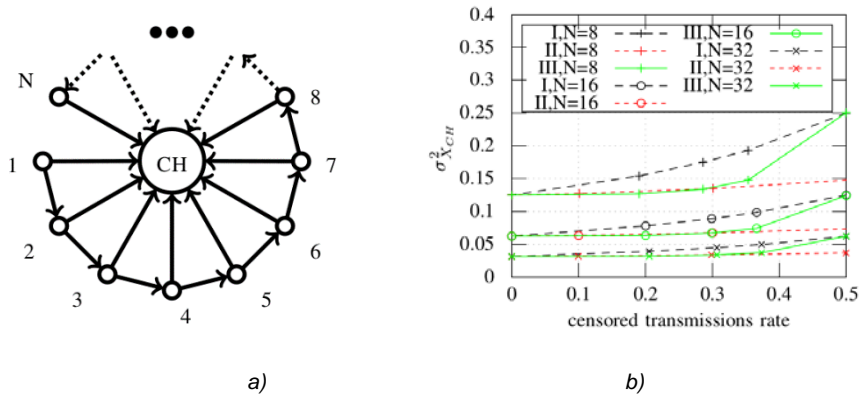


Fig. 3: Caracterización de algoritmos heurísticos de estimación distribuida.

En ambos trabajos [8][9] se observó el gran potencial que presenta la utilización de la técnica de censura al realizar tanto una estimación como un consenso distribuido.

5. Resultados a publicar

En los resultados publicados se caracteriza al estimador a través del MSE, cuando en realidad lo que nos interesa caracterizar es la CR. Surge la necesidad de definir métricas que nos permitan cumplir con esta necesidad. Las métricas propuestas son la tasa de censura (CTR, del inglés, Censored Transmission Rate) y la tasa de degradación, que miden por un lado el ahorro de mensajes y por el otro la pérdida de información que sufre la distribución luego de aplicar la censura de datos. El CTR se define como la esperanza de mensajes censurados sobre el total de los mensajes:

$$CTR(CR) = E\left(\frac{CT(CR)}{N}\right)$$

y la tasa de degradación se define como el cociente de la Información de Fisher (FI) de la distribución inicial y la distribución obtenida luego de la censura:

$$\Delta_{\theta}(CR) = \frac{I_{\theta, X}}{I_{\theta, X_{MT, TX}}} \quad (5)$$

Utilizando estas métricas se caracterizaron algunas CRs heurísticas en distintos escenarios, considerando distinto número de nodos, rangos de transmisión de los nodos, correlación entre nodos y fallas en las transmisiones. Estos resultados se pueden ver en la Fig. 4.

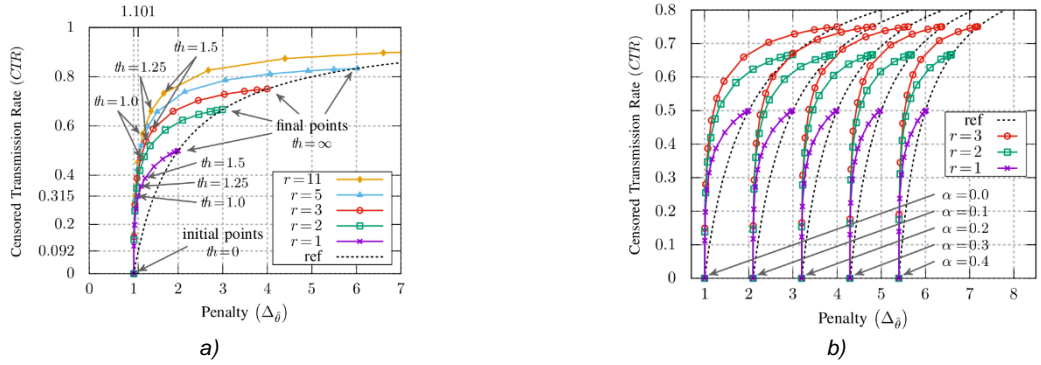


Fig. 4: Caracterización de reglas de censura utilizando el CTR y el Δ versus: a) el rango de los sensores y b) la correlación de las mediciones.

Posteriormente estas caracterizaciones son utilizadas para el dimensionamiento de una WSN en la que se pueden observar hasta un 40% de ahorro de energía al realizar una estimación distribuida. Estos resultados se resumen en la Fig. 5.

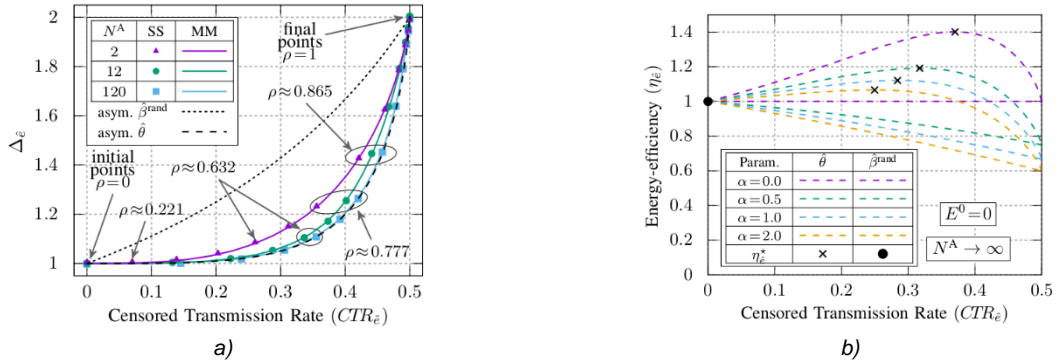


Fig. 5: En la figura a) se observa la caracterización de una estrategia de censura. En b) se observa un gráfico de la eficiencia energética del algoritmo en función del CTR.

Tras mostrar el potencial de varios algoritmos de censura y su aplicación en la realización de estimaciones distribuidas, se procedió a buscar la CR óptima (CR^{opt}) que permite maximizar el ahorro energético. Para ello se resuelve el siguiente problema de optimización.

$$\begin{aligned} &\text{encontrar} && CR^{\text{opt}} = \underset{CR}{\text{argmin}} \Delta_\theta(CR) \\ &\text{sujeto a} && CTR = CTR_0 \end{aligned} \quad (6)$$

La solución de este problema se alcanza de dos maneras distintas, una en un régimen asintótico, considerando un gran número de sensores. Para pocos sensores el problema se resuelve de manera numérica, para lo cual fue necesario transformar el problema en uno que sea posible resolver, computacionalmente hablando.

6. Trabajos futuros

Los trabajos futuros se basan principalmente en extender los resultados obtenidos para algoritmos de estimación distribuida a los algoritmos de consenso distribuidos, es decir, definir las métricas necesarias de manera de poder caracterizar las CRs, luego utilizar esta caracterización para dimensionar una WSN distribuida y finalmente buscar la CR óptima en este escenario. A estas tareas agregamos la publicación de los resultados.

7. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos hasta el momento, la idea de aplicar la técnica de censura a los algoritmos de estimación y consenso distribuido es muy prometedora. Este trabajo de tesis pretende brindar una metodología adecuada para la caracterización de algoritmos de consenso, además propone la manera de encontrar las estrategias óptimas y por última brinda las estrategias óptimas para ciertos escenarios.

Referencias

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, Volume 38, Issue 4, 2002, Pages 393-422.
- [2] A. Swami, Qing Zhao, Yao-Win Hong, Lang Tong. *Wireless Sensor Networks: Signal Processing and Communications Perspectives*. Chichester, England: J. Wiley, 2007.
- [3] Yunxia Chen and Qing Zhao, "On the lifetime of wireless sensor networks," in *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 11, pp. 976-978, Nov. 2005
- [4] E. J. Msechu and G. B. Giannakis, "Sensor-Centric Data Reduction for Estimation With WSNs via Censoring and Quantization," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 60, no. 1, pp. 400-414, Jan. 2012.
- [5] C. Rago, P. Willett and Y. Bar-Shalom, "Censoring sensors: a low-communication-rate scheme for distributed detection," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 554-568, April 1996.
- [6] S. Appadwedula, V. V. Veeravalli, and D. L. Jones, "Decentralized detection with censoring sensors," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, pp. 1362–1373, Apr. 2005.
- [7] E. J. Msechu and G. B. Giannakis, "Decentralized data selection for MAP estimation: A censoring and quantization approach," *14th International Conference on Information Fusion*, Chicago, IL, 2011, pp. 1-8.
- [8] F. G. Zacchigna and A. Lutenberg, "A novel consensus algorithm proposal: Measurement estimation by silent agreement (MESA)," *2014 Fifth Argentine Symposium and Conference on Embedded Systems SASE/CASE 2014*, Buenos Aires, 2014, pp. 7-12.
- [9] F. G. Zacchigna, A. Lutenberg and F. Vargas, "MESA: A formal approach to compute consensus in WSNs," *2015 Sixth Argentine Conference on Embedded Systems (CASE)*, Buenos Aires, 2015, pp. 13-18.

11

Estudio de efectos de escala viscosos en estructuras hidráulicas mediante modelación numérica

Badano Nicolás Diego^{1,2} y Menéndez Ángel Nicolás^{1,2}

¹ Programa de Hidráulica Computacional, Instituto Nacional del Agua, Argentina.

² Laboratorio de Modelación Matemática, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

El problema de los efectos de escala en la modelación física hidráulica

Dada la complejidad de los fenómenos hidráulicos, el diseño, optimización y verificación de estructuras hidráulicas complejas se apoya tradicionalmente en la realización de ensayos a escala reducida en modelos físicos. A pesar de que se han producido grandes avances en las últimas décadas en la modelación numérica de estos fenómenos, la modelación física sigue siendo la principal herramienta de apoyo para la ingeniería de grandes obras hidráulicas (Ercicum et al, 2016).

Un modelo físico a escala es completamente similar a su contraparte real cuando se cumplen tres criterios: similaridad geométrica, cinemática y dinámica (Yalin, 1971). En particular, esta última condición de similaridad dinámica implica que para cada fuerza actuante en cada punto del medio continuo el cociente entre su magnitud en el modelo y en el prototipo debe ser igual a una misma constante; es decir, debe existir una única escala de fuerzas. Este requerimiento es virtualmente imposible de cumplir con rigurosidad en el caso general, ya que requeriría el ensayo en un universo en miniatura (Heller, 2011), donde las propiedades del fluido y los parámetros físicos externos, como la presión atmosférica y la aceleración de la gravedad, estuvieran a escala. Esta condición podría aproximarse reemplazando el fluido del prototipo por otro y reemplazando la gravedad por una aceleración centrífuga, pero no se conocen casos en que este tipo de escalado se haya podido realizar completamente (Heller, 2011).

En la mayor parte de los casos prácticos se conservan las propiedades del fluido y se adopta con cuidado la relación entre la escala geométrica ($E_l = L_m / L_p$) y la escala de tiempo ($E_t = t_m / t_p$), de manera que se conserven a escala las dos fuerzas más importantes en flujos líquidos a superficie libre: la fuerza inercial y la de gravedad. Esto se conoce como escala de Froude. No obstante, todas las demás fuerzas, incluyendo las tensiones viscosas y la tensión superficial y la compresibilidad del fluido resultan fuera de escala.

Las fuerzas viscosas, que suelen ser las segundas en importancia, se caracterizan por el número de Reynolds del flujo, que mide su relación con las fuerzas inerciales. En la mayor parte de los flujos ingenieriles los números de Reynolds son muy altos, por lo que los efectos viscosos son bajos. El enfoque utilizado en la modelación física consiste entonces en adoptar una escala de modelo suficientemente grande de manera que las fuerzas fuera de escala sean de poca incidencia también en el modelo. No obstante, dado que los costos de un modelo físico escalan aproximadamente con E_l^{-3} (Le Méhauté y Hanes, 1990), normalmente se adopta una solución de compromiso y las fuerzas fuera de escala no resultan del todo despreciables. Esto genera diferencias entre los resultados del modelo físico y del prototipo, llamados efectos de escala (Ackers, 1987). El efecto distorsivo de estas fuerzas fuera de escala sobre cada una de las variables de interés del escurrimiento no es directamente cuantificable a partir de un único modelo físico.

La problemática de los efectos de escala se ha estudiado abundantemente mediante modelación física (Kobus, 1984), generalmente construyendo modelos del mismo problema en una serie de escalas. En este tipo de estudios el modelo de mayor escala toma el lugar del prototipo, y los efectos de escala se cuantifican por comparando los resultados de los demás modelos. No obstante, no puede determinarse directamente si el modelo más grande está o no afectado por efectos de escala no despreciables (Heller, 2011). Muchos estudios se enfocaron a la determinación de escalas mínimas necesarias para obtener una representación aceptable desde el punto de vista ingenieril de diversos problemas típicos, como por ejemplo descarga vertederos de cresta ancha (Hager, 1994), tirantes y aireación en resaltos hidráulicos (Hager y Bremen, 1989; Chanson, 2009), vórtices superficiales en tomas (Anwar et al., 1978), trayectoria en saltos de esquí (Heller et al., 2005), entre muchos otros. Generalmente al utilizar estas escalas mínimas solo las características principales del fenómeno se representan aceptablemente. No obstante, en determinados casos las fuerzas fuera de escala pueden ocasionar fenómenos secundarios cuyo efecto sobre alguna de las variables de interés compita en magnitud con los producidos por el fenómeno a modelar (Menéndez y Badano, 2011).

Estrategia de evaluación mediante modelación numérica

Este trabajo se desarrolla como parte de una investigación que busca evaluar la capacidad actual de los modelos numéricos para analizar el impacto de los efectos de escala hidráulicos que se presentan en la modelación física de diversos casos típicos de estructuras hidráulicas.

Dado que los modelos numéricos pueden simular el efecto combinado de todas las fuerzas que intervienen tanto a escala de prototipo como de modelo físico, sin necesidad de descartar ninguna de ellas a priori, resulta tentador utilizarlos para determinar los efectos marginales de las fuerzas fuera de escala, y eventualmente poder extrapolar resultados de una escala a otra. No obstante, los modelos numéricos aún tienen desafíos pendientes, como el problema de simular con precisión la turbulencia; su resolución directa para problemas de alto número de Reynolds (típicos de la ingeniería hidráulica) no es viable aún por su altísimo costo computacional, por lo que debe modelarse usando tratamientos aproximados (Promedios de Reynolds, Simulación de Grandes Vórtices, etc). Por lo tanto, no es factible por el momento prescindir por completo de la modelación física a escala.

La estrategia propuesta por lo tanto, consiste en complementar ambos tipos de modelación, aprovechando las ventajas de ambas. La modelación numérica se construye en primer lugar con la misma escala reducida del modelo físico, que por lo tanto puede utilizarse para realizar la mejor calibración posible en igualdad de condiciones y validar el modelo numérico. Luego la modelación numérica se repite a escala de prototipo, de manera de corregir los problemas de escala y obtener una mejor predicción de la respuesta esperable a tamaño real (Menéndez y Badano, 2011; Menéndez et al., 2013).

Para que esta extrapolación sea válida, es necesario estudiar con detalle cómo responden los distintos tratamientos matemáticos y numéricos, por ejemplo los modelos de turbulencia, ante diversas escalas. Es importante cuantificar los errores esperables frente a resultados experimentales, y poder compararlos con efectos de escala típicos, para determinar en qué casos pueden distinguirse los efectos de escala de manera confiable. También es necesario evaluar qué tratamientos son más aptos para cada escala y qué tan confiable es alternar entre tratamientos para cada caso.

El problema de la fricción

Uno de los problemas tipo en que pueden aparecer efectos de escala apreciables es cuando se simulan reservorios a superficie libre unidos por redes de conductos. Como se explicó anteriormente, si en un problema es necesario utilizar escala de Froude, los efectos viscosos quedan fuera de escala. En el seno del fluido, la influencia de la viscosidad suele ser despreciable a escala de prototipo, y adoptando un modelo físico suficientemente grande puede también hacerse despreciable a escala. No obstante, cerca de la pared, sobre todo si esta es hidráulicamente lisa, las fuerzas viscosas son siempre importantes. Estas quedan irremediablemente fuera de escala en la modelación física.

Cuando las paredes son hidráulicamente rugosas, en principio es más fácil escalar correctamente la modelación física. No obstante, es difícil representar correctamente a escala la rugosidad del prototipo, ya que se requieren materiales de rugosidad variable de acuerdo a la escala de modelo y la rugosidad esperable del prototipo. Además, dado que las obras hidráulicas pueden requerir evaluarse para distintos caudales, no siempre resulta posible conservar los efectos rugosos a escala.

El problema de reservorios unidos por conductos es de relevancia porque muchas esclusas modernas responden esa tipología. Este es el caso del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá. En su modo de funcionamiento más simple, estas poseen tres cámaras en serie, conectadas por conductos longitudinales de gran longitud (Figura 1). Estos conductos además presentan condiciones de pared lisa, dada su gran sección transversal. Por lo tanto, se observó que las predicciones realizadas en modelo físico sobre las pérdidas de carga en estos conductos presentaron efectos de escala, y por tanto los tiempos de llenado y vaciado de las esclusas, que son su principal indicador de desempeño, no resultaron predichos con precisión por el modelo.

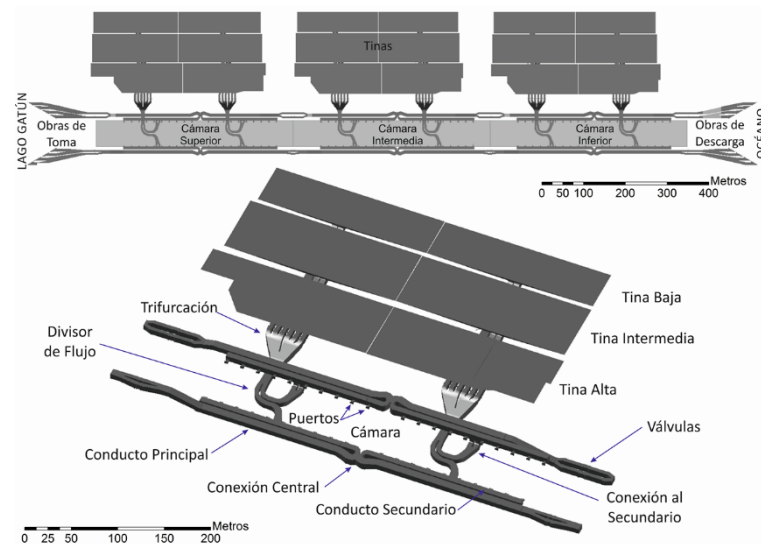


Figura 1. Esquema del sistema de llenado y vaciado del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá

En este trabajo se discute la viabilidad de utilizar modelos numéricos para calcular estos efectos distorsivos viscosos y obtener una mejor predicción del comportamiento del prototipo, a través de dos estrategias de modelación de distinta complejidad.

Tratamiento unidimensional

La primera alternativa consiste en construir un modelo hidrodinámico unidimensional del sistema. El sistema se modela como una serie de componentes interconectados, incluyendo:

- Reservorios, que representan los almacenamientos del sistema (como las cámaras del sistema de esclusas, así como sus tinas laterales). Estos reservorios están caracterizados por curvas altura-volumen.
- Conductos rígidos, que representan las conducciones del sistema. Para representar las pérdidas de carga por fricción en estos pueden utilizarse ecuaciones como las de Darcy-Weisbach o Colebrook-White, derivadas de experimentos y bien probadas, que ofrecen el factor de fricción en función del número de Reynolds del escurrimiento.
- Pérdidas de carga locales, ya sea constantes en el tiempo para representar las singularidades del sistema (curvas, embocaduras, cambios de forma, etc), o variables para representar aperturas y cierres de las válvulas del sistema.

A pesar de ser sencillo, un modelo de estas características permite calcular a escala correcta tanto las fuerzas gravitacionales y de inercia (como un modelo físico a escala de Froude) como las fuerzas viscosas en los conductos, caracterizadas por el número de Reynolds.

Como incertidumbre aparecen los coeficientes de pérdida locales de las singularidades del sistema. Estos, que en principio tienen una muy baja dependencia de la viscosidad, pueden obtenerse ya sea por modelación física o mediante modelos numéricos CFD.

En todo caso, cuando existe un modelo físico del sistema, como en el caso particular del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá, al utilizar este tratamiento unidimensional

se puede aplicar la estrategia descrita más arriba: simular primero numéricamente el problema a escala reducida, para calibrar o validar el modelo numérico por comparación; finalmente, cambiar la escala del modelo numérico a la del prototipo.

Este procedimiento fue aplicado exitosamente en el caso del Tercer Juego de Esclusas. Se encontraron diferencias en los tiempos de llenado y vaciado de orden de 10%, diferencias en los caudales picos del sistema del orden de 5%, y un agravamiento general de la predicción de entrada de aire en las válvulas. Los resultados para una de las operaciones del Tercer Juego de Esclusas se presentan en la figura 2.

Tratamiento tridimensional

Otro tratamiento del problema consiste en construir un modelo tridimensional de tipo CFD del problema. Esto brinda más flexibilidad, porque permite simular no solo casos de conductos de sección constante, como en el tratamiento unidimensional, sino también problemas en que la capa límite genera efectos de escala en componentes singulares del sistema.

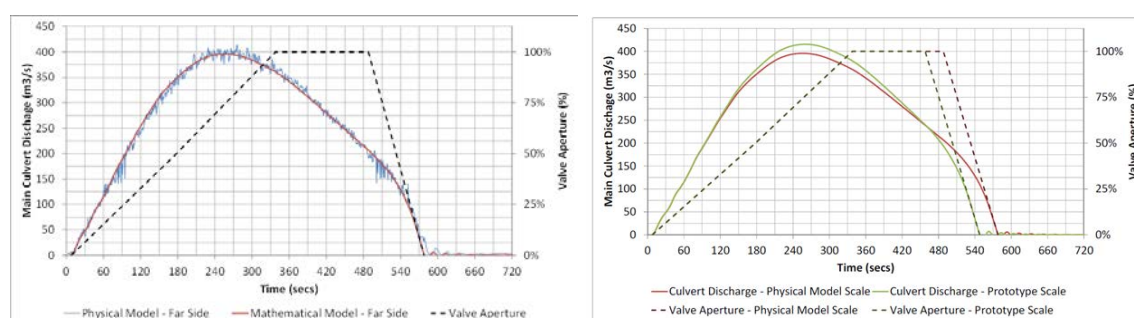


Figura 2. Comparación entre modelo físico y modelo numérico a escala reducida (izquierda). Comparación del desempeño del modelo físico y del prototipo, calculados con un tratamiento unidimensional (derecha).

Existen antecedentes en que se han utilizado estos modelos para simular efectos de escala viscosos (Kim & Park, 2005). No obstante, esto no ha sido acompañado de un análisis que muestre que los modelos numéricos empleados pueden efectivamente reproducir los efectos friccionales producidos por la capa límite.

A este efecto se han realizado un estudio comparando la precisión de distintos modelos de turbulencia y tratamientos de pared al calcular factores de fricción en conductos lisos y rugosos para un amplio rango de números de Reynolds. En la figura 3 se presenta una selección de los resultados obtenidos para conductos hidráulicamente lisos, con distintos tratamientos de pared y modelos de turbulencia. Se ha encontrado que los errores en el factor de fricción están en todos los casos por debajo del 10%. En cada caso se han caracterizado también los requerimientos de malla y los rangos de aplicabilidad de los tratamientos.

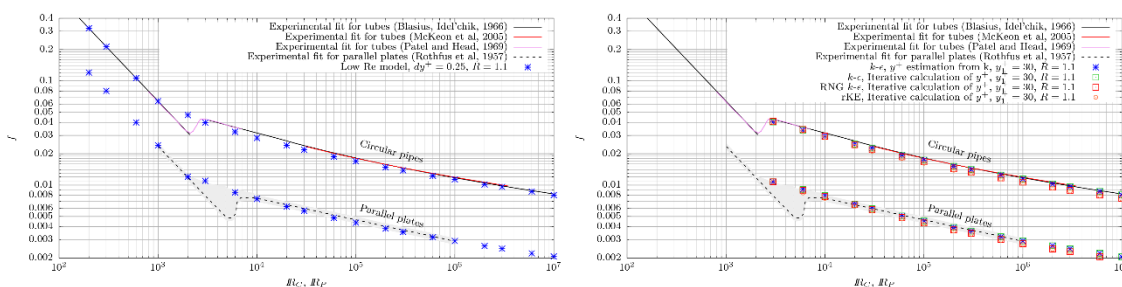


Figura 3. Precisión de distintos modelos de turbulencia para calcular factores de fricción en conductos hidráulicamente lisos; tratamiento Low-Reynolds Number (izquierda) y tratamiento con funciones de pared logarítmica (derecha).

Referencias

- Ackers P., 1987. Scale models. examples of how, why and when - with some ifs and buts. *Proc. of Technical Session B, XXII IAHR Congress*. Lausanne, Switzerland.
- Chanson H., 2009. Turbulent air-water flows in hydraulic structures: Dynamic similarity and scale effects. *Environmental Fluid Mechanics*, 9:125–142.
- Ercicum, S., Tullis, B.P., Lodomez, M., Archambeau, P., Dewals, B.J., & Piroton, M., 2016. Scale effects in physical piano key weirs models. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 692–698.
- Hager W., 1994. Brechkroniger Überfall (vertederos de cresta ancha). *Wasser Energie Luft*, 86:363–369.
- Hager W. y Bremen R., 1989. Classical hydraulic jump: Sequent depths. *Journal of Hydraulic Research*, 27:565–585.
- Heller V., Hager W. y Minor H., 2005. Ski jump hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 131:347–355.
- Heller V., 2011. Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*, 49:293–306.
- Kim, D.G., Park, J.H, 2005. Analysis of Flow Structure over Ogee-Spillway in Consideration of Scale and Roughness Effects by Using CFD Model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 9(2):161-169.
- Kobus H., editor, 1984. *Proc. of the Symposium on scale effects in modelling hydraulic structures*. IAHR, Esslingen, Germany.
- Le Méhauté B. y Hanes D., 1990. *Ocean engineering science, the sea. B.*, 29, Similitude, 955–980. Wiley, New York.
- Menéndez A. y Badano N., 2011. Interaction between hydraulic and numerical models for the design of hydraulic structures. Hydrodynamics. ISBN 978-953-307-893-9.
- Menéndez A., Badano N. y Lecertua E., 2013. A strategy for the interaction between hydraulic and numerical models. XXXV IAHR World Congress, Chengdu, China.
- Yalin, M. (1971). *Theory of hydraulic models*. Macmillan, London.

12

Estudio de propagación de ondas electromagnéticas en un medio poroso: Monitoreos electromagnéticos y complementación con monitoreos sísmicos

Curcio Ana, Jacovkis Pablo y D' Onofrio Enrique

Resumen

El objetivo del presente trabajo es estudiar la respuesta electromagnética generada al realizar operaciones de fractura hidráulica en un reservorio no convencional, factible desde el punto de vista geofísico ya que al realizar dicha operación se pasa de un medio resistivo (reservorio cargado de hidrocarburo) a un medio con un alto contraste de resistividad eléctrica, generado por el agua inyectada, en dicho medio resistivo. Por las bondades de la prospección geofísica con métodos electromagnéticos, se propone además comparar y complementar su respuesta frente a la respuesta sísmica. Este estudio es de particular interés ya que contribuye con la caracterización de la geometría de las fracturas hidráulicas, determinación del volumen de roca estimulado, análisis de anisotropía (que está relacionada con el estado de esfuerzos en subsuelo) y sistemas de fallas geológicas. Como resultado se contribuye al análisis geo-ingenieril, reducción de riesgos en ubicaciones de pozos y completación de los mismos, lo cual se traduce en mejoras en la producción de hidrocarburo.

1. Introducción

La operación de fracturamiento hidráulico consiste en inyectar fluidos a alta presión en un reservorio para producir o conectar fracturas, creando vías en las que los hidrocarburos fluyen hacia el pozo (Riahi y Damjanac, 2013). Este procedimiento es requerido en depósitos no convencionales debido a su baja permeabilidad, ya que permite aumentar la porosidad y permeabilidad de los yacimientos.

La caracterización de la geometría de fractura hidráulica es muy importante para el evaluar la efectividad de la terminación del pozo y estudiar el reservorio. La tecnología microsísmica es una herramienta útil que aporta al conocimiento geológico de los sistemas de fallas, fracturas naturales, conectividad entre pozos, geomecánica, y anisotropía sísmica. Sin

embargo, existen varios casos de estudio, en los que la técnica microsísmica a pesar de hacerse un correcto diseño y procesamiento, no logra inferir la ubicación del propante, generando incertidumbres en el cálculo del volumen de reservorio estimulado (SRV), y es aquí donde las herramientas electromagnéticas (EM) pueden jugar un papel importante durante el procedimiento de fracturamiento hidráulico. Por lo tanto, el objetivo de este proyecto es:

1. Estudiar la anomalía electromagnética generada al efectuarse una operación de fracturamiento hidráulico en un reservorio no convencional.
2. Construir un análogo a microsísmica y estudiar la manera en que se complementan ambas metodologías.
3. Estudiar el efecto de la anisotropía eléctrica de las rocas.

2. Impacto en la industria

2.1 ¿Qué es un reservorio no convencional?

En los reservorios o yacimientos convencionales, las características porosas y permeables de las rocas que lo conforman permiten que los hidrocarburos contenidos en sus poros microscópicos fluyan bajo ciertas condiciones hacia el pozo, en muchos casos con sistemas de bombeo. Decimos que un reservorio es no convencional para hacer referencia a los reservorios cuya porosidad, permeabilidad, mecanismo de entrapamiento u otras características difieren respecto de los reservorios tradicionales (Anadón et al., 2013) (Figura 1).

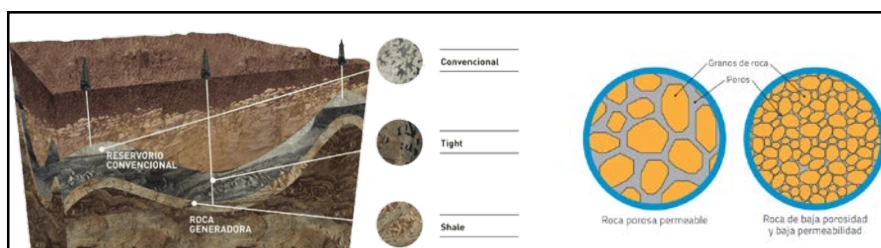


Figura 1: (Izquierda) Definición de reservorio no convencional. Sistema Petrolero. (Derecha) comparación petrofísica entre un reservorio convencional y no convencional.

Particularmente en el presente proyecto referiremos a reservorio no convencional a aquel cuya permeabilidad, en varios ordenes de magnitud, es menor al descrito anteriormente, así como su porosidad. Se analiza la respuesta electromagnética al realizar fracturamiento hidráulico aplicable a dos tipos de reservorios:

1. Reservorios shale: El shale es una roca de grano muy fino con mineralogía y contenido de arcilla variable, alto contenido orgánico, complejidad textural y suficiente grado de madurez que lleva a la generación de hidrocarburo (gas o petróleo). Se caracteriza por presentar muy baja permeabilidad, baja porosidad efectiva con un sistema de porosidad dual micro a nanométrica (orgánica e intergranular), fábrica laminar y de gran extensión areal (Curcio et al. 2013). Estos shales ricos en materia orgánica son simultáneamente roca generadora, reservorio y sello, siendo considerados por ello reservorios no convencionales. A diferencia de los yacimientos convencionales, éstos no necesitan de trampa estructural y no presentan contacto hidrocarburo-agua ni hubo proceso migratorio. Una descripción y evaluación de las diferentes fuentes de información, estudios y herramientas para la definición de variables críticas en la caracterización de un reservorio de shale puede encontrarse en Curcio et al. (2013).

2. Reservorios tight: Esta nomenclatura en general es una definición arbitraria que no depende de la conformación y composición de la roca, sino de su permeabilidad (facilidad de los fluidos para moverse dentro de ella), que es tan baja, que no permite el flujo del gas hacia el pozo, aunque no tanto como la de los esquistos y lutitas (Anadón et al., 2013).

No Convencional y la República Argentina en el mundo.

En la Figura 2 se muestra un mapa con la ubicación de los reservorios shale en el mundo, publicado por la secretaria de US Energy Information Administration (EIA) donde se presentan las reservas técnicamente recuperables a nivel mundial. Se estima que la República Argentina ocupa el segundo lugar en reservas recuperables de shale gas (801 Tcf, trillion cubic feet) y el tercer lugar en reservas recuperables de shale oil (27 MM, billion o miles de millones de bariles).

En Argentina, las formaciones no convencionales en producción son Vaca Muerta (Shale oil / gas), Lajas (tight gas), Mulichinco (tight oil / gas), D-129 (shale oil / gas), mientras que se encuentran otras oportunidades en Yacoraite (Shale / tight oil & gas), Los monos (Shale gas), Los Molles (Shale / tight gas), Agrio (Shale oil), Golfo San Jorge Neocomiano (Shale oil gas), Devonian - Permian (Shale oil) ,Cacheuta (Shale oil), Porterillos (Tight oil) e Inoceramus (www.ypf.com).

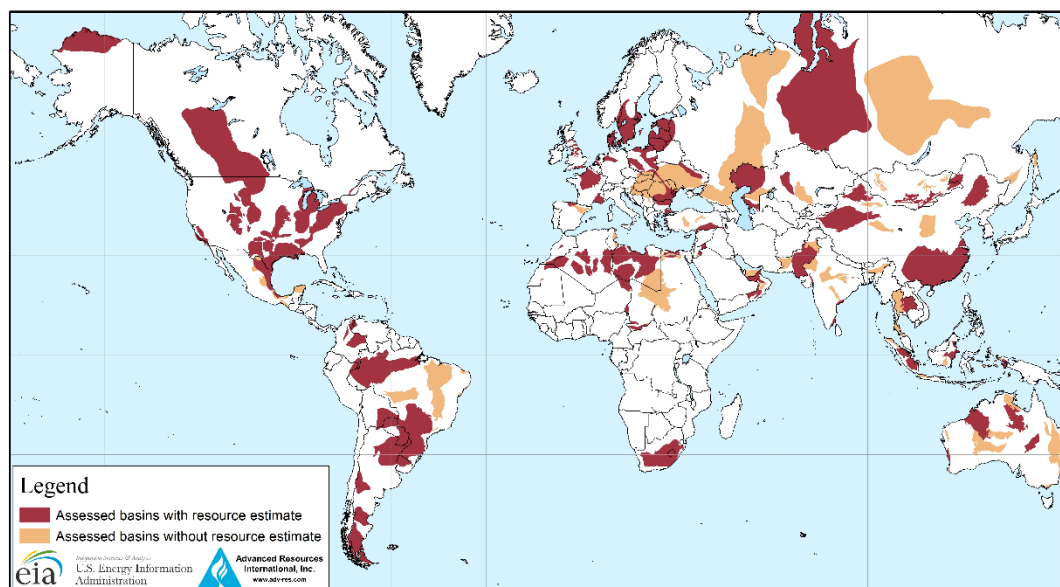


Figura 2: Cuencas de shale en el mundo (EIA, 2015).

2.3 ¿Cómo se producen?: Estimulación por fracturamiento hidráulico.

El objetivo de los tratamientos de fractura hidráulica es estimular la producción del pozo, inyectando fluidos de alta presión para estimular la red de fracturas y mejorar la permeabilidad y producción. La fractura generada hidráulicamente se produce cuando la presión de inyección excede el nivel mínimo de estrés en las rocas, tal que la ruptura de las rocas es por tensión y creando propagación de dicha tensión o presión desde el pozo, desarrollándose ortogonalmente a la dirección de esfuerzo mínimo (Maxwell, 2014) (Figura 3).

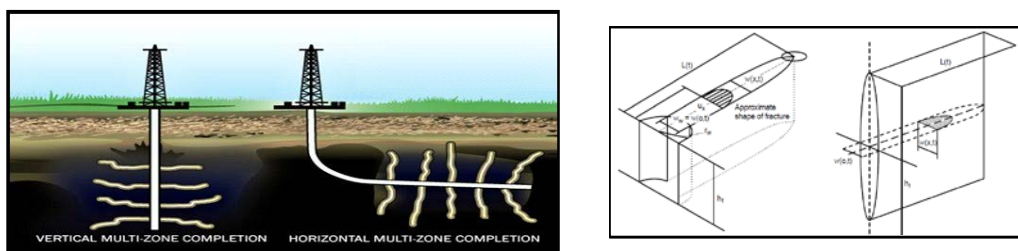


Figura 3: (Izquierda) Esquema de pozo vertical y horizontal fracturados hidráulicamente (esircworldwide.com). (Derecha) Modelos físicos simples que representan una fractura vertical (PKN) y una fractura horizontal (KGD) (Economides, 2000).

2.3 ¿Cómo se ‘monitorea’ hoy?: Microsísmica

Es muy importante para los ingenieros de estimulación y de reservorios, realizar un correcto diseño de la fractura hidráulica así como realizar un seguimiento de la evolución de la misma, no solo para reducir riesgos al evitar contactar capas no deseadas si no para la planificación del desarrollo del yacimiento. Esta es la razón por la que interesa ‘monitorear’ las fracturas hidráulicas, que hoy en día se realiza con una técnica geofísica llamada microsísmica.

Al inyectar fluido en el pozo a altísima presión, se va fracturando la roca, de acuerdo al estado de esfuerzos local, produciendo emisiones acústicas llamadas ‘microsismos’ (Figura 4). Los principios físicos que describen la microsísmica son los mismos que gobiernan los fenómenos sismológicos: se estudian ondas producidas por una fuente cuya ubicación no se conoce. Estas señales acústicas son colectadas por unos sensores llamados geófonos (colocados en superficie o en otro pozo llamado pozo monitor) y luego de procesarse las mismas se determinan sus posiciones y magnitudes, reconstruyendo así, la zona estimulada desde el punto de vista geomecánico.

Sin embargo, una interpretación confiable de toda la nube de microsismos, está sujeta al correcto diseño de la adquisición y procesamiento de las señales colectadas, que debe considerar efectos que si se ignoran, pueden llevar a una determinación incorrecta de las ubicaciones de cada evento impactando en la geometría de dicha nube, definiendo una geometría incorrecta de la fractura y pudiendo generar repercusiones económicas significativas (Taylor y Curcio, 2015). Uno de los puntos más críticos es la determinación del SRV, por las incertidumbres en las variables incluidas en su cálculo y por la complejidad en la determinación del tipo de movimiento de la roca o deformación geomecánica que lo creó. Existen varios casos de estudio, en los que la técnica microsísmica no logra inferir la ubicación del propante, responsable del SRV, y es aquí donde las herramientas electromagnéticas (EM) pueden jugar un papel importante durante el procedimiento de fracturamiento hidráulico.

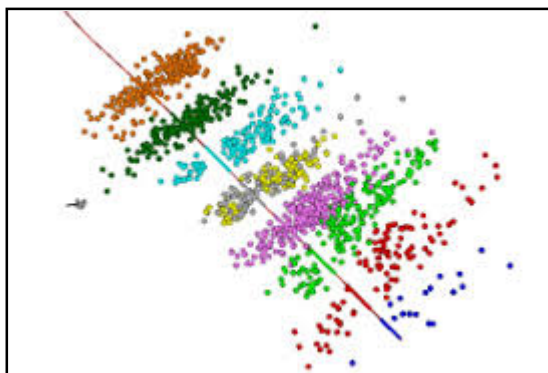


Figura 4: Ejemplo de nube de microsismos para 8 etapas de fractura (www.egsolutions.com)

2.4 Anisotropía en reservorios no convencionales

Uno de los efectos a considerar en un reservorio no convencional es el causado por la anisotropía, definiéndose la misma como la variación de una propiedad física con la dirección de propagación.

La anisotropía a escala de yacimientos, en términos generales, puede deberse a propiedades de la roca como la orientación preferencial de los granos minerales, orientación preferencial en las formas de los minerales isotrópicos, laminaciones u orientación preferencial de los cracks.

En cualquier caso, la anisotropía distorsiona las señales que estamos analizando, impactando en la caracterización del reservorio y por lo tanto en las evaluaciones económicas. Anisotropía sísmica es la variación de la velocidad con la dirección de propagación, impactando su evaluación en la determinación del estado de rigidez en el subsuelo y por lo tanto en el estado de esfuerzos en el subsuelo. Anisotropía eléctrica es la variación de la resistividad eléctrica con la dirección considerada, impactando en la determinación de un modelo de rigidez así como en los cálculos a partir de saturaciones en la formación. En este proyecto importa evaluar el impacto de la anisotropía eléctrica (o variación de la resistividad eléctrica con la dirección considerada) en modelos geológicamente plausibles.

3. Métodos electromagnéticos (EM) aplicados al monitoreo de fractura hidráulica

Durante el procedimiento de fracturamiento hidráulico, la formación pasa de estar saturada con hidrocarburos a estar saturada con fluido de fractura (posiblemente incluyendo propante con la capacidad de incrementar la conductividad eléctrica), que a su vez induce una anomalía de conductividad eléctrica. Esta anomalía es dinámica, y consecuentemente los coeficientes de las ecuaciones de Maxwell son dependientes del espacio-tiempo. Este fenómeno está ligado a las variaciones de conductividad eléctrica porque durante la estimulación, se produce un flujo de fluido más conductivo que el background y además los parámetros petrofísicos cambian.

Por lo tanto, el objetivo es estudiar el análogo EM al procedimiento de microsísmica y construir un concepto dinámico que los una. Esto implica determinar parámetros petrofísicos, presión, saturación y en consecuencia la conductividad eléctrica en función de las variables en espacio tiempo.

3.1 Desarrollo de la Tesis Doctoral

Para estudiar el problema expuesto, se ha seguido el cronograma presentado en la Figura 5. El mismo incluye los siguientes pasos:

1. Tomar cursos, analizar los diferentes métodos numéricos, factibilidad, caso 1D.
2. Entendimiento de reservorios no convencionales, caracterización, y tecnología de monitoreo de fractura hidráulica con microsísmica de superficie y de pozo y anisotropía sísmica (habilidades desarrolladas en la industria petrolera).
3. Desarrollo del caso 2D: La solución aproximada de las ecuaciones de Maxwell se obtuvo utilizando un método mixto de elementos finitos (FEM) (Monk (1992), Nedelec (1980, 1986)). La discretización espacial de las ecuaciones de Maxwell se logra utilizando la combinación de espacios de elementos finitos de Nedelec. Se utilizó el paso del tiempo Leapfrog para la discretización del tiempo, de modo que la secuencia es primero resolver el campo eléctrico usando una iteración de gradiente conjugado preconditionado y luego resolviendo para el campo magnético.

Se plantea el modelo continuo, forma débil, ensamble y se programa el algoritmo correspondiente. Se proporciona un análisis de estabilidad de este método FEM. Se desarrolla una versión anisotrópica del caso 2D.

4. Integración del caso 2D electromagnético con mapa microsísmico, interpretando en conjunto anomalía de presión, de saturación, campo eléctrico, campo magnético, corriente eléctrica y resistividad eléctrica.
5. Desarrollo del caso 3D anisotrópico: utilizando el mismo método numérico que en el caso 2D, extendido al 3D. En este caso se estudian las mejores configuraciones Receptor-Transmisor para las diferentes geometrías de fractura hidráulica. Se plantea el modelo continuo, forma débil, ensamble y se programa el algoritmo correspondiente. Se elabora también una grilla variable.

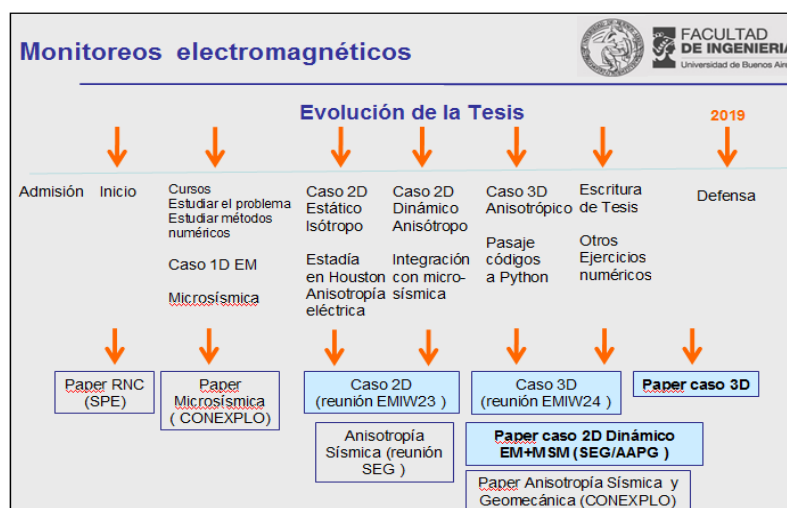


Figura 5: Evolución de la tesis Doctoral. En recuadro azul, las publicaciones producto de la tesis y el resto son las relacionadas con la tesis.

En la figura 6 se adjunta un listado de las publicaciones/presentaciones realizadas en este periodo, ya sea producto de la tesis en sí (en azul) o estén relacionada por su temática con la misma (en negro).

Monitoreos electromagnéticos FACULTAD DE INGENIERIA Universidad de Buenos Aires

Evolución de la Tesis

2018

'Hydraulic Fracturing Monitoring: New Concept of Electromagnetics linked to Elastic modeling', A. Curcio, L. Macías, Interpretation (SEG/AAGP), 2018. **Aceptado.**

'Electromagnetic Monitoring in Unconventional Reservoirs: a 3D anisotropic approach', A. Curcio. The 24th International Workshop on EM Induction in The Earth, Helsingør, Dinamarca, 2018.

Reducing Geomechanical Model Uncertainties: Anisotropy Study using a Multicomponent Walk-Away VSP and Walk-Around VSP, Neuquina Basin, Argentina', A. Curcio, X Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Mendoza, 2018.

'Anisotropy study of deep unconventional reservoir inverting Walkaway VSP data, Argentina', Ana Curcio, Adriana Grosso, Rafael Perez, Oscar Barrios, 86th SEG annual meeting, Dallas, Octubre 2016.

'Hydraulic Fracturing EM monitoring: A Leapfrog-FEM algorithm applied to unconventional reservoirs', A. Curcio, The 23rd International Workshop on EM Induction in The Earth, Chiang Mai, Thailand, 2016.

'Principles and Observations to effective microseismic mapping and derived studies. An example on Vaca Muerta Formation, Neuquina Basin'. S. Taylor, A. Curcio, IX Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Mendoza, 3-7, 2014.

'Valor de la información en reservorios no convencionales', A. Curcio, D. Jait, SPE, 2013.

2013

Figura 6: Lista de publicaciones, citadas en las referencias.

3.2 Ejemplo numérico

Para entender las ideas expuestas anteriormente, se presenta una simulación de la

respuesta electromagnética y su interpretación conjunta con un mapa de fractura hidráulica de un reservorio no convencional.

En este caso se ha trabajado con un flujo de trabajo compuesto por los siguientes pasos:

- Simulación de la inyección de fluido, usando un simulador multifase multiflujo donde las salidas son mapas de presión y saturación que representan la anomalía generada por la fractura hidráulica (Se realiza con el código de libre uso BOAST (Fanchi, 1997)).

- Simulación de la propagación de la fractura para reservorios de baja permeabilidad, a partir de los mapas de presión y criterios de ruptura de la roca (Economides and Hill, 1994, Macias, 2015).

- Simulación de la respuesta electromagnética en un reservorio no convencional a partir de mapas de saturación y relaciones petrofísicas utilizando elementos finitos mixtos (Nedelec, (1980, 1986)) para la discretización espacial y Leapfrog time stepping para la discretización en tiempo (Yee, 1986).

Esta fase es realizada por A. Curcio durante su doctorado e incluye las 'novedades':

- Simulación conjunta de generación y propagación en espacio tiempo de mapas de presión, saturación, campo eléctrico, campo magnético, corriente eléctrica y resistividad eléctrica (Figura 7).

- Interpretación conjunta de dichas salidas, donde se concluye lo siguiente:

- A partir de un tiempo dado, la evolución de la saturación y por lo tanto los campos eléctrico y magnético tienen un crecimiento menor que la anomalía de presión. Esta información puede ser útil a futuro a fines de reprogramar operaciones en tiempo real.

- La anomalía electromagnética provee información adicional al cálculo del Volumen de Roca Estimado (SRV, stimulated Reservoir Volume) ajustándolo mejor que la anomalía de presión o su correspondiente mapa microsismico.

- Los resultados muestran que desde el punto de vista teórico esta respuesta sería medible y que el patrón de distribución del campo magnético es más sensible a la saturación de agua que el patrón de distribución del campo eléctrico, correlacionable con la corriente eléctrica

- Análisis de estabilidad del método numérico.

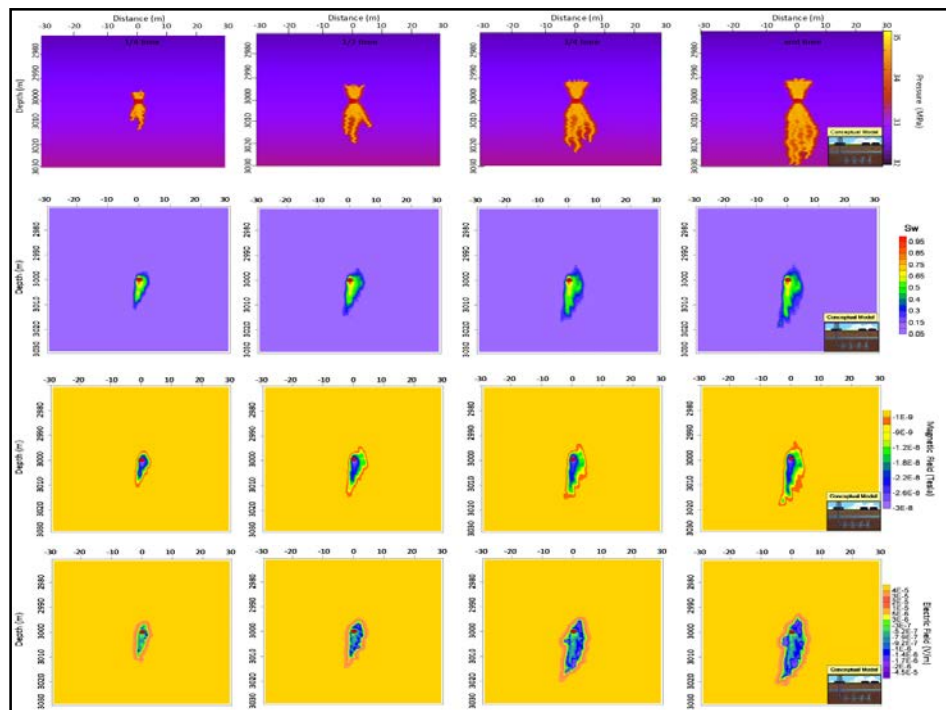


Figura 7: Evolución en espacio tiempo de la anomalía de presión, de saturación, campo eléctrico y campo magnético (Curcio et al, 2018).

4. Conclusiones

Se ha presentado el estado del arte y actuales problemas de monitoreo de fracturas hidráulicas en un reservorio no convencional, proponiendo los métodos electromagnéticos como una tecnología que puede complementar los métodos sísmicos.

El aporte de la presente tesis doctoral está en:

- Construcción de simuladores 2D y 3D anisotrópico para estudiar la respuesta electromagnética al realizar una operación de fracking.
- Se han probado diferentes configuraciones Receptor-Transmisor para ambos casos
- Se ha realizado análisis de estabilidad del código 2D
- Se ha complementado con microsísmica y mostrado el potencial de esta tecnología.

5. Referencias

Anadón E., Casalotti, V., Masarik, G., Halperin, F., 2013, El abecé de los hidrocarburos en reservorios no convencionales, Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, ISBN 978-987-9139-65-3, <http://www.iapg.org.ar>

Curcio, A., Macias, L., 2018, 'Hydraulic Fracturing Monitoring: New Concept of Electromagnetics linked to Elastic modeling', A. Curcio, L. Macias, Interpretation (SEG/AAGP), <https://doi.org/10.1190/int-2018-0040.1>

Curcio, A., 2018 'Electromagnetic Monitoring in Unconventional Reservoirs: a 3D anisotropic approach', The 24 th International Workshop on EM Induction in The Earth, Helsingor, Dinamarca,

Curcio, A., 2018, Reducing Geomechanical Model Uncertainties: Anisotropy Study using a Multicomponent Walk-Away VSP and Walk-Around VSP, Neuquina Basin, Argentina', X Congreso de Exploración de Hidrocarburos

Curcio, A., A. Grosso, R. Perez, and O. Barrios-Lopez, 2016, Anisotropy study of deep unconventional reservoir inverting walkaway VSP data, Argentina: 86th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 362–366, doi: 10.1190/segam2016-13577602.1

Curcio, A., 2016 , 'Hydraulic Fracturing EM monitoring: A Leapfrog-FEM algorithm applied to unconventional reservoirs'. The 23th International Workshop on EM Induction in The Earth, Chiang Mai, Thailand.

Curcio, A., Jait, D., 2013, 'Valor de la información en reservorios no convencionales', SPE.

Economides, M. J., and A. D. Hill, 1994, Petroleum production systems: Prentice Hall PTR.

Economides and Nolte, 2000, Reservoir Stimulation, Wiley.

EIA, 2011. World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions Outside the United State. U.S. Energy Information Administration (EIA), Washington DC, EE.UU. pp: 365

Fanchi, J., 1997, Principles of applied reservoir simulation: Gulf Professional Publishing.

Gallegos, E., ¿Qué son los yacimientos No Convencionales?, <https://www.ypf.com/energiaypf>

Macias, L. A., G. B. Savioli, J. E. Santos, J. M. Carcione, and D. Gei, 2015, Analysis of capillary pressure effect on the seismic response of a CO₂ storage site applying multiphase flow and wave propagation simulators: *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 39, 335–348, doi: 10.1016/j.ijggc.2015.05.027.

Maxwell, S., 2014, *Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs* SEG Distinguished Instructor Short Course.

Monk, P., 1992, A comparison of three mixed methods for the time-dependent Maxwell's equations: *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 13, 1097–1122, doi: 10.1137/0913064.

Nedelec, J. C., 1980, Mixed finite elements in r_3 : *Numerische Mathematik*, 35, 315–341, doi: 10.1007/BF01396415.

Nedelec, J. C., 1986, A new family of mixed finite elements in r_3 : *Numerische Mathematik*, 50, 57–81, doi: 10.1007/BF01389668.

Riahi, A., and B. Damjanac, 2013, Numerical study of interaction between hydraulic fracture and discrete fracture network: Presented at the International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing.

Taylor and Curcio, 2014, 'Principles and Observations to effective microseismic mapping and derived studies. An example on Vaca Muerta Formation, Neuquina Basin', IX Congreso de Exploración de Hidrocarburos, 307 – 325.

13

Las Redes Eléctricas del Futuro, ¿Ya están acá? (Impacto de la generación distribuida en la red de distribución de BT)

Alejandro Jurado

*Grupo de Energía y ambiente (GEA)
Departamento de Energía-FIUBA*

Resumen

En los últimos años, un nuevo interés está creciendo no solo en el mundo, sino también en Argentina: la inserción de generación distribuida de energía renovable intermitente a pequeña escala (GD). Uno de los requisitos fundamentales para ese objetivo es la determinación de un marco reglamentario adecuado. Específicamente, estamos obligados a sugerir un límite máximo factible para la inserción de energía para cada usuario. Ese límite debe tener en cuenta las características de las redes de distribución y el comportamiento de los consumidores. En este documento, presentamos una breve introducción al tema y una síntesis del trabajo desarrollado para alcanzar este objetivo.

Introducción

La incorporación de micro y mini generación, “Generación Distribuida (GD)”, con energías renovables hace cambiar la condición tradicional del sistema eléctrico pasando de un estado pasivo a uno activo produciéndose un cambio en la distribución de la potencia y en las características dinámicas de la red eléctrica, originando importantes problemas técnicos que deben ser considerados para su planeamiento.

Muchas son las variables en juego en el nuevo paradigma de la generación y distribución eléctrica: la GD, los almacenadores de energía, los vehículos eléctricos, la demanda programable y la gestión de la energía. Es claro en este contexto que una expansión masiva y descontrolada de la GD podría conducir a efectos nocivos, los cuales no fueron previstos con anterioridad en la planificación a largo plazo de la red de distribución.

Generalmente, el diseño de redes de distribución solo considera la posibilidad de un flujo de energía unidireccional. Ahora, la inserción de la DG intermitente a pequeña escala en redes requiere pensar de otra manera. El diseño debe agregar nuevas variables y condiciones al problema tradicional de determinar las características técnicas de la red para una demanda determinada. Ahora, el tamaño óptimo del transformador de MT / BT y del

conductor de BT se ve afectado por la cantidad, el tamaño y la distribución de la potencia DG. Pero este factor, al igual que la demanda de energía del cliente individual, es una variable de naturaleza estadística, y es necesario tener en cuenta este hecho en los cálculos eléctricos generales. La figura 1 muestra una red pasiva y activa respectivamente.

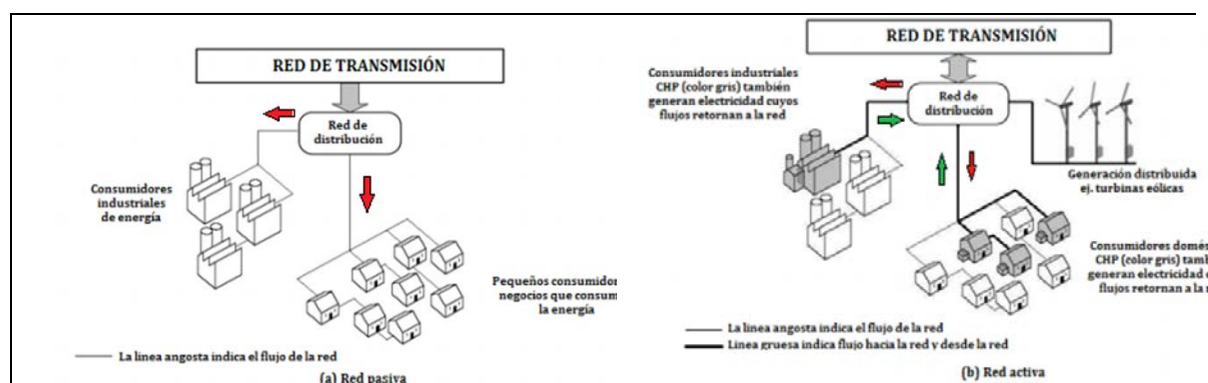


Fig.1: Red pasiva y activa

Unidades de generación

En este nuevo concepto de red eléctrica el consumidor puede generar su propia energía a partir de fuentes renovables pudiendo autoconsumir lo generado o inyectarlo a la red dependiendo de los incentivos económicos. La figura 2 muestra una vivienda como unidad de generación, en ella puede verse como cada unidad gestiona su energía pudiendo consumir o generar energía o ambas cosas a la vez. La figura 3 representa la relación entre la curva de demanda de un usuario y la curva de generación, en este caso de energía solar. Se puede ver que en las horas de generación la demanda es totalmente abastecida por ésta lográndose el autoconsumo. El excedente de generación puede volcarse a la red eléctrica, cargar un vehículo eléctrico o bien cargar un almacenador para usarse en otro momento.

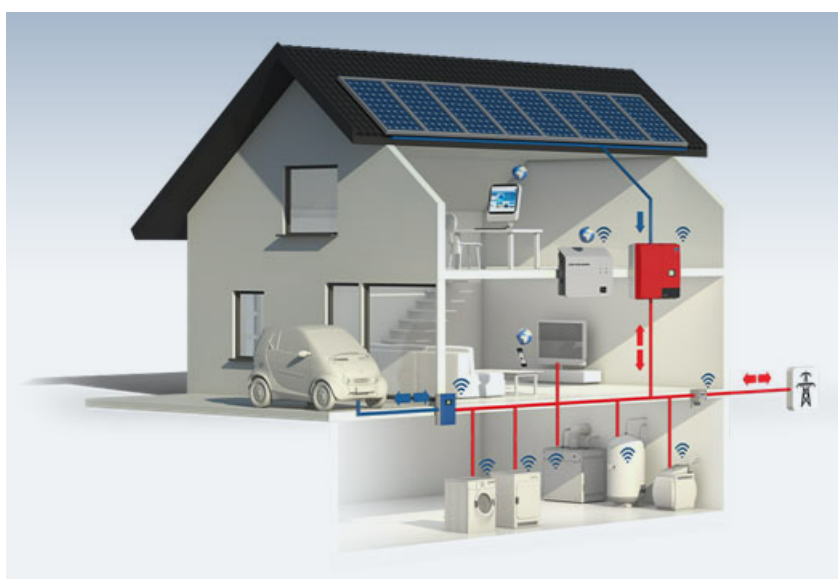


Fig.2: unidad de generación y consumo

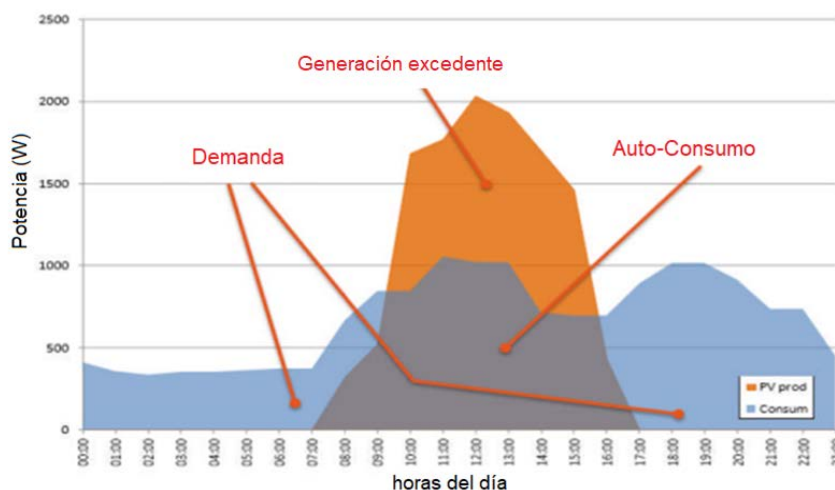


Fig.3: Curva de demanda y generación solar

Características de la GD con renovables

La generación distribuida con energías renovables presenta determinadas características que pueden presentarse como ventajas y desventajas:

Ventajas:

- Facilita la incorporación de energías renovables.
- Pueden reducirse costos de inversión de las redes de distribución y transmisión
- Reduce las pérdidas de energía.
- Puede mejorar la calidad de la energía entregada.

Desventajas:

- Mayor dificultad en la planificación de la red.
- Incertidumbre en la generación.
- Requiere incorporar mayor inteligencia en la red de distribución para su gestión, "REDES INTELIGENTES"

Metodología de estudio propuesta

La idea principal es simular el sistema con la demanda aleatoria y la generación aleatoria de energía renovable mediante un proceso de Monte Carlo. La herramienta es un algoritmo desarrollado para resolver la red en esa situación. El siguiente paso es establecer límites de penetración regulados, para cada densidad de demanda, y diferentes tamaños de transformador de MT / BT y conductor de BT. Los límites regulados propuestos son variados. Los límites reales permitidos para cada situación de tipo se encuentran repitiendo el proceso. Finalmente, los niveles de pérdidas técnicas y la calidad del servicio para diferentes niveles de penetración se comparan con respecto al diseño básico de la red. Esto permite proponer un límite regulado probable para la inserción de generación renovable intermitente individual a pequeña escala. Este es un primer paso hacia la búsqueda de un consenso sobre los parámetros a tener en cuenta, los objetivos a perseguir y la metodología a seguir al regular la inserción de la DG de energía renovable intermitente, como se espera en un futuro bastante cercano en Argentina. La figura 4 muestra la metodología planteada.

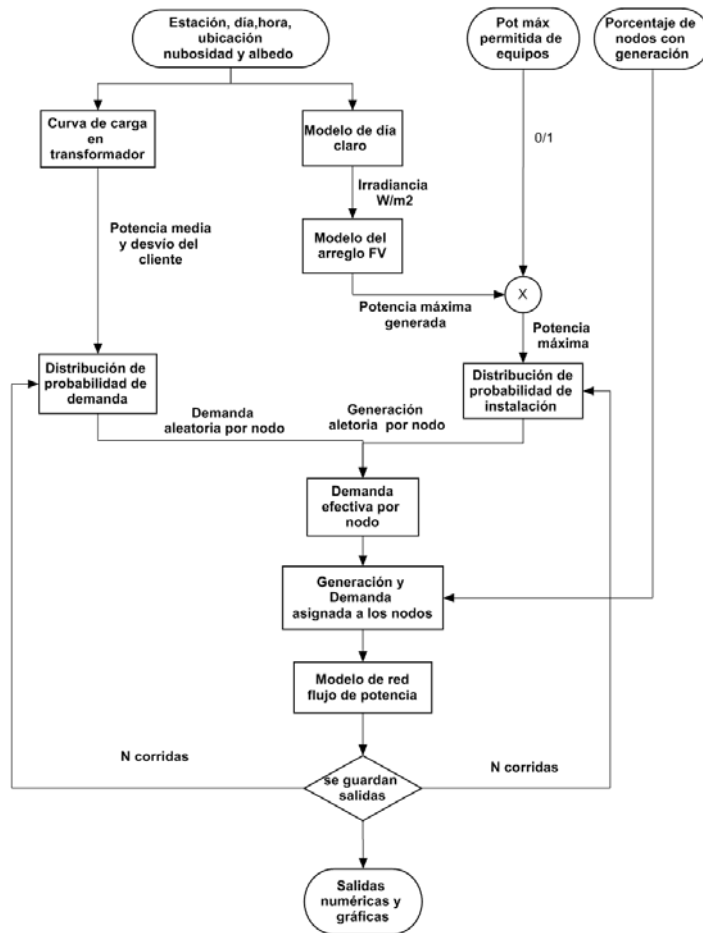


Fig. 4: Metodología propuesta

Estudios y resultados

Para el siguiente trabajo se ha realizado un estudio sobre una red eléctrica de baja tensión con inserción de energía solar en distintos niveles. Luego sobre la misma red se analizo la carga de vehículos eléctricos, a continuación se muestran algunos de los resultados obtenidos. La figura 5 muestra el perfil de tensión de la red para distintas penetraciones de GD.

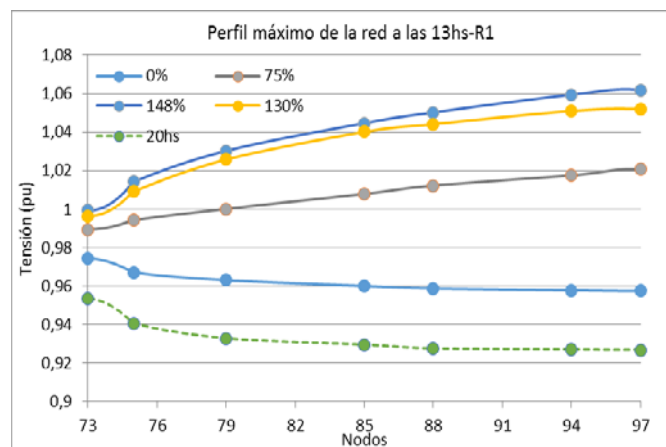


Fig.5: Tensión máxima de la red

La figura 6 representa las pérdidas técnicas como función de la penetración, se observa que las pérdidas disminuyen al aumentar la penetración hasta llegar a un mínimo y luego comienzan a crecer.

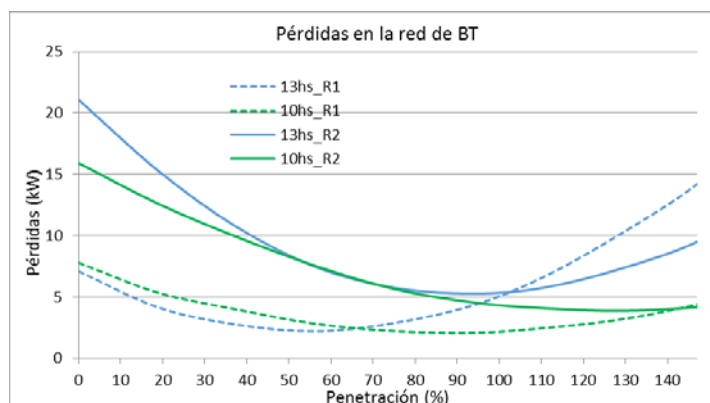


Fig.6: Pérdidas técnicas

La figura 7 muestra el flujo de potencia activa a través del transformador para dos horarios distintos. Puede verse que en el horario de mayor generación, para el escenario propuesto, la penetración de GD no supera el 60 % por encima de este valor se invierte el flujo de potencia activa en el transformador.

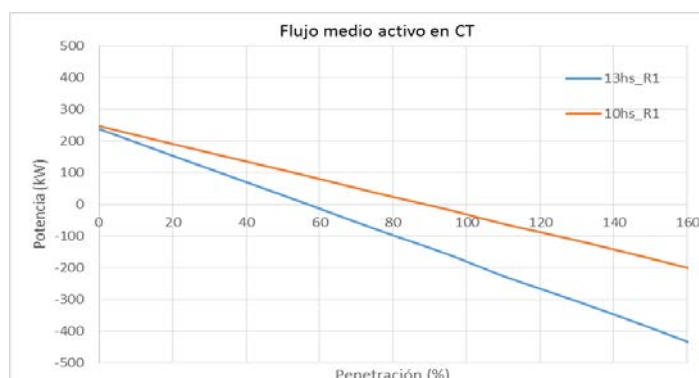


Fig.7: Flujo de potencia activa en el transformador

Inclusión de vehículos eléctricos (VE)

La obtención de un perfil de carga de los VE no es tarea sencilla ya que depende de varios factores como el nivel de penetración y el comportamiento y hábitos de los conductores. La introducción del comportamiento humano es lo que hace difícil su modelado.

El comportamiento y hábitos de los conductores pueden clasificarse en comportamiento respecto a la movilidad y comportamiento respecto a la carga. El primero de ellos se corresponde con la distancia recorrida, tipo de vehículo, forma de manejo, etc. y tiene influencia particularmente en el tiempo de arribo y tiempo de carga. El segundo, está relacionado con la frecuencia de carga y por lo tanto a la localización, afectando esto a los puntos de demanda sobre la red y al tiempo de carga.

Para estudiar el impacto de los VE en la red de baja tensión es necesario evaluar la cantidad de vehículos que cargan sus baterías en un instante determinado, la duración del proceso de carga y la vinculación de estos con la curva de demanda. Con estos datos se determinan los nodos afectados en cada instante a la carga de los VE que, considerando la demanda

estadística por usuario determinan la carga neta por nodo de la red de BT en cada instante. La figura 8 representa para 50 vehículos la cantidad de ellos que se encuentran tomando carga a determinada hora.

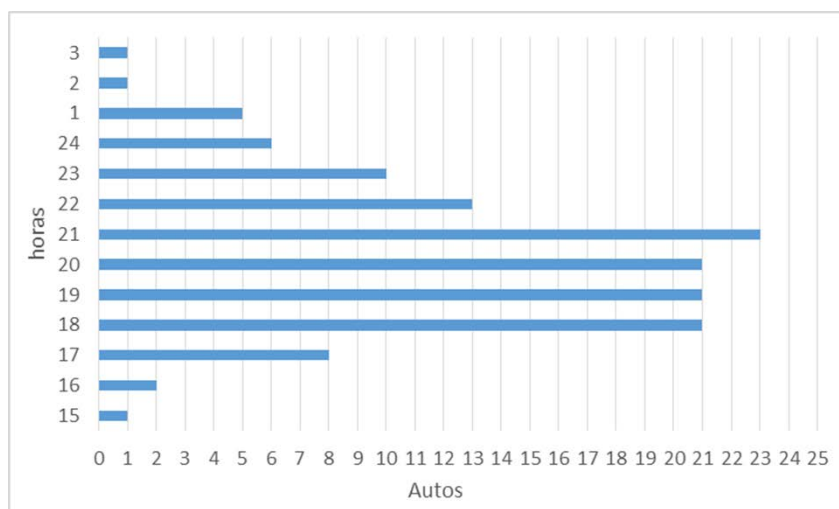


Fig.8: VE tomando carga a cada hora

Como resultado preliminar se muestra la figura 9 donde puede verse la tensión máxima estadística en el nodo más alejado del transformador en función de las horas del día para tres escenarios distintos: caso base, sin VE, 30 % de penetración de VE y 60 % de penetración de VE. Se observa que al aumentar la penetración de los VE la tensión cae.

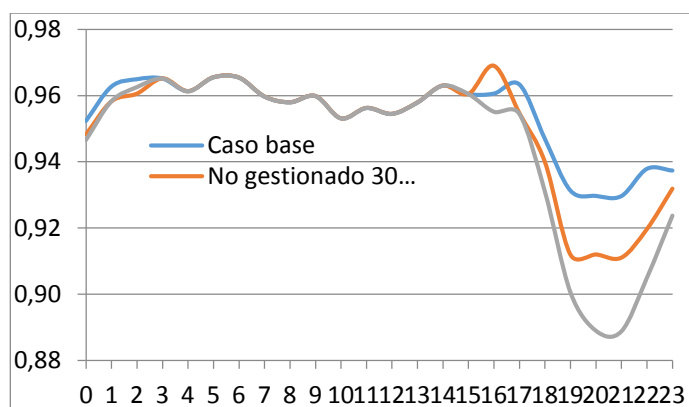


Fig.9: Tensión en el nodo más alejado

Conclusiones

Si bien este trabajo es solo una pequeña muestra del proyecto planteado pueden establecerse unas primeras conclusiones generales acerca del mismo. La incorporación de la GD, autos eléctricos, etc. añaden al análisis variables estadísticas que deben ser tenidas en cuenta a la hora de realizar estudios sobre las redes eléctricas. Se puede establecer también que una baja penetración de GD o de VE no reviste mayor problema para la red eléctrica, pero a medida que aumenta la penetración de estos elementos las redes presentan problemas de estabilidad de tensión, variación en las pérdidas técnicas e inversión en el flujo de potencia. En estas condiciones se hacen necesarios estudios para determinar el comportamiento de la red eléctrica.

Bibliografía

Jurado A. Nicchi F. Vinson E. 2017, "Regulation for insertion of small-scale intermittent renewable energy distributed generation in Argentina" IET Digital Library, volume2017, issue1, p.2861-2864.

Demailly. F, Ninet,O. Even, A., 2005, "Numerical Tools and Models for Monte Carlo Studies of the Influence on Embedded Generation on Voltage Limits in LV Grids", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol 20 N°3.

Dickert,J. Schegner, P., 2010, "Residential Load Model for Network Planning Purposes", *Modern Electric Power Systems 2010*, Wroclaw, Poland.

Nima H. Tehrani, Peng Wang. 2015. "Probabilistic estimation of plug-in electric vehicles charging load profile". *Electric Power System Research* 124 (2015)133-143. Elsevier.

14

Generación de energía eléctrica utilizando cursos de agua

David Hernán Menéndez Arán y Ángel Nicolás Menéndez

Laboratorio de Modelación Matemática (LaMM)

Marco global sobre la energía hidrocínética

Las distintas fuentes de energía, las consecuencias de su agotamiento y las fluctuaciones en los precios de dicha energía en el mercado mundial forman el eje del debate energético global. La creciente necesidad de energía y los impactos ambientales asociados a toda obra de generación, sumado a la preocupación por el Cambio Climático, han llevado a la búsqueda de nuevos horizontes en el área de energías renovables no contaminantes. Esta coyuntura mundial ha permitido el desarrollo de una fuente de energía poco explotada hasta el momento: *la energía hidrocínética*, que implica la utilización de la energía cinética contenida en las corrientes de los ríos, las corrientes de mareas, y las corrientes en canales artificiales para la generación de energía eléctrica.

A diferencia de los proyectos hidroeléctricos convencionales, que utilizan saltos de agua artificiales creados a través de presas de embalse o tuberías forzadas, los proyectos hidrocíneticos no afectan significativamente el flujo natural de un cauce. Por eso se espera que los proyectos de mayor envergadura tengan un impacto ambiental mucho más reducido que el generado por proyectos hidroeléctricos convencionales o de energía mareomotriz.

El entusiasmo mundial por este nuevo campo tecnológico se evidencia en la gran cantidad de proyectos comerciales y de investigación que han surgido en las últimas dos décadas. Entidades como el EPRI en Estados Unidos y BC Hydro/Triton y NRC en Canadá han analizado el potencial de energía de corrientes de mareas en Norteamérica, y varios proyectos piloto están ya instalados en zonas de gran potencial. El Departamento de Energía de los EEUU, EPRI, el Laboratorio Nacional Idaho, y la Asociación de Hidroenergía Nacional estadounidense han avanzado en desarrollos para el uso de turbinas hidrocíneticas en ríos y canales. Ya en el año 2000, la turbina comercial de eje vertical Kobold se probó en el estrecho de Messina entre Sicilia y la costa italiana como parte del proyecto Enemar. Existen varios proyectos ya instalados en Europa, entre los que se destacan Meygen (en el Reino Unido) y Normandía (Francia), ambos provistos por turbinas de gran potencia de la empresa SIMEC Atlantis¹.

¹ <https://simecatlantis.com>

Muchos proyectos existen hoy día en distintos niveles de desarrollo, desde etapas tempranas de diseño conceptual hasta la construcción de modelos a escala, prototipo en escala real, o los primeros modelos de producción industrial. Esta figura refleja tanto la gran cantidad de etapas necesarias para el desarrollo de una nueva tecnología, como las dificultades en llegar a etapas de comercialización. En las últimas dos décadas muchas empresas privadas han fallado y cancelado sus proyectos de investigación, mientras que otras han surgido con nuevas tecnologías y proyectos.

A pesar del interés global en esta nueva tecnología, existe también un importante número de obstáculos a superar para asegurar su viabilidad técnica y económica. Una serie de cuestiones de base necesitan ser resueltas, como por ejemplo los estudios detallados de disponibilidad del recurso, además de preguntas relacionadas a la tecnología que aún no se han resuelto: los mejores materiales a utilizar en ambientes agresivos, si la utilización de un ducto o tobera es deseable, la disposición óptima de las turbinas en una granja hidrocínética o en un canal de irrigación, etc. La producción de modelos comerciales ha resultado lenta, y la tecnología no ha sido aún adoptada en escala comercial.

Tipos de dispositivos hidrocínéticos

La cantidad de energía en un flujo de agua depende directamente de la densidad del agua, el área del tubo de corriente aprovechable, y la velocidad del fluido al cubo. Adicionalmente, la eficiencia de los procesos de conversión hidrodinámico, mecánico y eléctrico reducen la eficiencia total del sistema. Mientras la utilización de sistemas de turbinas se considera en general como la opción más eficiente, otros sistemas alternativos sin turbina también se encuentran en desarrollo en el ámbito privado y universitario: "flutter vane", basado en el fenómeno de resonancia hidroelástica; vibraciones inducidas por vórtices; sistemas piezoeléctricos, y otros.

Dentro de los sistemas de turbinas, se puede realizar la siguiente clasificación:

- *Turbinas axiales (eje horizontal)*: El eje rotacional del rotor es paralelo a las líneas de flujo del agua ingresante.
- *Turbinas de eje vertical*: El eje rotacional es vertical respecto a la superficie del agua y también ortogonal a las líneas de corriente del agua ingresante.
- *Turbinas cross-flow*: El eje rotacional es paralelo a la superficie del agua, pero ortogonal a las líneas de corriente del agua ingresante.
- *Turbinas venturi*: El agua es acelerada en un sistema de ahorcamiento tipo Venturi, que crea un gradiente de presión y permite aumentar la eficiencia de una turbina interior.

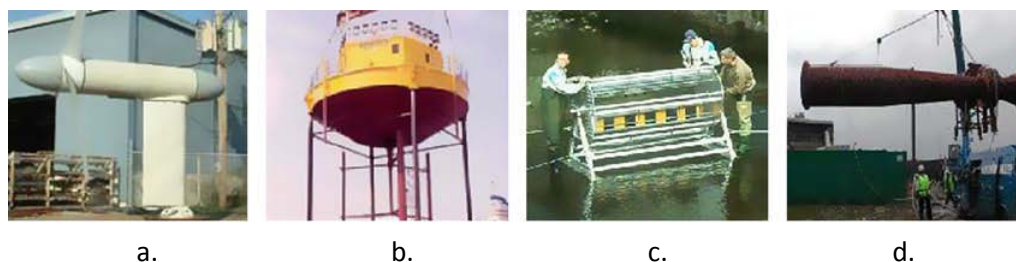


Fig. 2. Ejemplos de sistemas de turbinas para aprovechamientos hidrocínéticos: a) Free Flow; b) Kobold; c) Atlantisstrom; d) HydroVenturi (de Khan et al, 2009)

Khan et al (2009) realizaron un estudio sobre las tecnologías disponibles en el mercado mundial, clasificándolas de acuerdo a distintos parámetros: zona de aplicación (corrientes de mareas, corrientes ríos, o de aplicación múltiple); tipo de tecnología, de acuerdo a la clasificación detallada previamente; uso o no de ducto/tobera, una estructura secundaria que puede potencialmente aumentar la eficiencia de las turbinas pero presenta problemas de durabilidad y diseño propios, y ubicación dentro del cauce. En referencia al último de los parámetros, existen tres tipos de estructuras de montaje: estructuras montadas en el lecho marino (BSM), estructuras flotantes (FSM) y estructuras cercanas a la superficie (NSM).

Las Figuras 3.a y 3.b resumen los resultados del estudio, incluyendo los sistemas sin turbina antes mencionados. Aunque han surgido en los últimos años un importante número de conceptos novedosos en el área de generación hidrocinética, la mayoría de los desarrollos pertenecen al dominio de las turbinas axiales de eje horizontal y las turbinas verticales. De hecho, casi la totalidad de los proyectos comerciales avanzados se encuentran dentro de estos grupos.

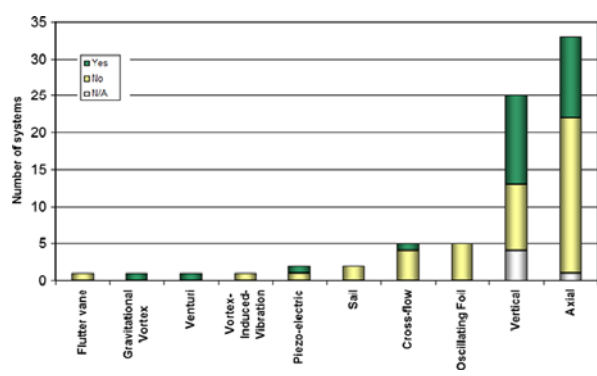


Fig. 3.a. Uso de ductos/toberas y tipos de sistemas de conversión (de Khan et al, 2009)

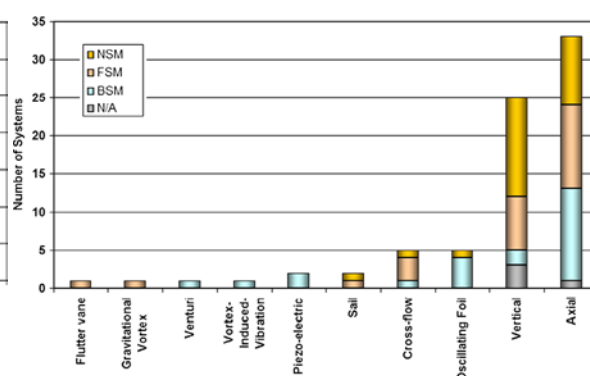


Fig. 3.b. Clasificación de acuerdo al tipo de ubicación dentro del cauce y del sistema de conversión (de Khan et al, 2009).

El informe de Khan et al (2009) también hace hincapié en el hecho de que la mayoría de los desarrolladores privados y de los investigadores trabajan en tecnologías de gran versatilidad de aplicación, sin limitarse a ríos y corrientes de mareas. El uso de ductos/toberas, por otro lado, es preponderante en turbinas verticales, probablemente debido a que su materialización es más simple (sección rectangular).

Las turbinas de mayor potencia unitaria nominal son de eje horizontal y alcanzan en la actualidad 1,5 MW, con rotores de 16 metros de diámetro. Son ubicados en ámbitos estuarinos con corrientes de alta velocidad alternante, por lo que cuentan con álabes con capacidad de rotar 360 grados. Este tipo de diseño presenta una serie de ventajas sobre las turbinas de eje vertical: alta eficiencia sin necesidad de ductos/toberas, facilidad para el auto-arranque, menores fluctuaciones en el torque generado y alta velocidad de operación. La Figura 4 presenta una turbina Atlantis, instalada en la costa escocesa en 2017. Hasta el momento se han instalado cuatro turbinas, y se planea la instalación de 8 turbinas más en 2018 y 2019.



Fig. 4. Turbina Atlantis de 1,5 MW de potencia nominal; proyecto MeyGEN²

Diseño y optimización de turbinas de eje horizontal

Albert Betz determinó en 1920, a través de la teoría de actuador en disco, que la máxima eficiencia de extracción de energía de un flujo de agua para ese tipo de dispositivo era $16/27 = 59,26\%$, conocido hoy en día como el *límite de Betz*. Esto representa el límite físico máximo de eficiencia esperable para una turbina eólica o hidrocínética de eje horizontal en el caso de velocidad de rotación y número de palas infinito, y flujo uniforme invíscido (no viscoso). Los diseños modernos más sofisticados alcanzan eficiencias máximas de alrededor de 40% para condiciones nominales, lo que muestra la importancia de los procesos de optimización de la geometría de la turbina.

El estudio de turbinas hidrocínéticas de eje horizontal se ha basado en gran medida en los desarrollos teóricos realizados para los sistemas eólicos equivalentes y para el análisis de hélices de barco. Por este motivo, su fundamento teórico se encuentra altamente desarrollado en comparación con el de los otros sistemas de turbinas mencionados en la sección anterior. Sin embargo, las características particulares de las turbinas hidrocínéticas hacen necesario la reformulación de dicha teoría para tener en cuenta las nuevas condiciones de flujo y de borde.

Los métodos de diseño de palas se realizan en general mediante la aplicación de métodos de análisis bidimensionales de tipo prueba-y-error hasta que se halla la sección con el menor arrastre para la condición de diseño especificada. Ya en 1964, Tulin aplicó la teoría de cavitación linealizada para el diseño sistemático de secciones supercavitantes, mediante la metodología del mapeo conformado. Otros métodos de diseño se basan en tablas, como las de Rutgersson (1979), obtenidas mediante un estudio sistemático en modelos físicos de palas cavitantes. Sin embargo, estas metodologías pueden ser utilizadas solamente para secciones que puedan representarse mediante mapeo conformado o que hayan sido

² <https://simecatlantis.com/projects/meygen/>

estudiadas en prototipos. A diferencia de lo que sucede en la industria de las hélices de barco, las palas de turbinas hidrocínéticas no cuentan con estos desarrollos previos.

Un método popular para el diseño de hélices es el llamado *método de diseño inverso*, donde el diseñador especifica la distribución de presiones en la pala y calcula la geometría que genera dicha distribución. Sin embargo, es muy difícil conocer a priori la distribución de presiones que resultará en la hidropala más eficiente, por lo que en general este método depende en gran parte de la experiencia del diseñador.

Para salvar las dificultades de este método y obtener distribuciones de presiones en forma analítica, es posible utilizar modelos numéricos y teóricos simplificados para representar turbinas axiales, y luego realizar un procedimiento de optimización analítico. Falcao de Campos (2007), Epps (2010) y Menéndez Arán (2013) utilizaron modelos de línea de sustentación para representar palas de turbinas hidrocínéticas, buscando obtener a partir de la optimización del modelo resultante una distribución de la circulación en la pala que maximizara el torque generado y por lo tanto la eficiencia de la turbina. Baltazar y Falcao de Campos (2011) y Xu y Kinnas (2010) utilizaron modelos de elementos de contorno para analizar la eficiencia de la turbina considerando la influencia del cubo y la alineación de su estela.

Estos modelos de tipo potencial tienen la ventaja principal de que permiten un análisis rápido de un problema de flujo complejo, y son en general muy eficientes desde el punto de vista del costo computacional. Sin embargo, todos estos métodos requieren de condiciones de borde ideales y difícilmente pueden adaptarse para el análisis de situaciones muy lejanas a la de diseño. Los algoritmos utilizados en el proceso de optimización, por otro lado, no pueden considerar la influencia del espesor de la pala, el camber o la cuerda de sus secciones. De esta manera, los diseños obtenidos a partir de las distribuciones de presiones obtenidas solo pueden considerarse como preliminares, y su refinamiento depende nuevamente de mediciones en modelos físicos o de la experiencia del diseñador. No se conocen ejemplos en la bibliografía de procedimientos de optimización analíticos realizados a partir de modelos de flujo viscoso tridimensional.

Como alternativa a estos métodos de diseño inverso, es popular la utilización de técnicas de optimización numérica usadas en combinación con *métodos de análisis de flujo tridimensionales*. Este método comienza con la evaluación de una geometría de pala inicial. Luego, el algoritmo de optimización busca una geometría de pala mejorada, que cumpla con todas las condiciones de borde impuestas, utilizando la información provista por el método de análisis de flujo. En la mayoría de los casos, el análisis de flujo es mucho más computacionalmente intensivo que el proceso de optimización numérica. Esto es aún más marcado cuando se utilizan métodos de análisis que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes, como en el caso del desarrollo de Lee y Eyi (1990). La Figura 5 presenta un mismo diseño de palas de turbina analizado con tres métodos numéricos, para evaluar su desempeño y caracterizar el flujo circundante.

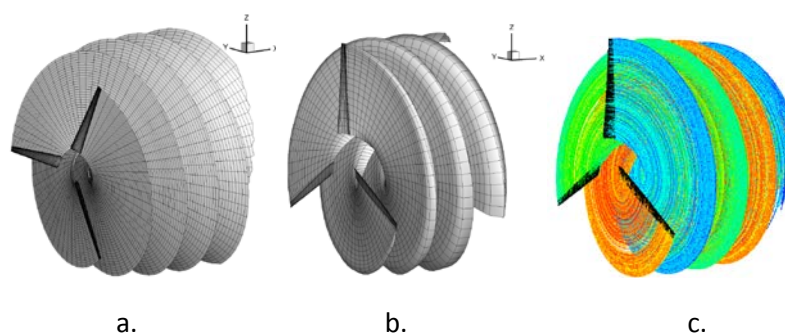


Fig. 5. Turbina hidrocínética de eje horizontal analizada con tres metodologías distintas:
 a) Método de Elementos de Contorno; b) Método de Superficie de Sustentación;
 c) Modelo de Volúmenes Finitos RANS (de Xu y Kinnas, 2010)

La gran complejidad del problema de optimización de turbinas hidrocínéticas, el elevado costo computacional que requieren los modelos de flujo tridimensionales viscosos aún hoy en día y el interés internacional por esta tecnología incipiente transforman su estudio en un campo fértil para la investigación científica. En las próximas décadas deberán consolidarse los diseños óptimos y determinar las mejores prácticas de análisis, de manera de permitir que el estudio de turbinas hidrocínéticas deje detrás la etapa de estudios en modelos y prototipos y se transforme en una industria internacional de envergadura.

Referencias

- J. Baltazar, J. A. C. Falcao de Campos. "Hydrodynamic analysis of a horizontal axis marine current turbine with a Boundary Element Method." *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 133 (2011).
- A. Betz. "Das Maximum Der Theoretisch Möglichen Ausnützung Des 682 Windes Durch Windmotoren." *Z. Das Gesamte Turbinenwesen* n° 26, pp. 683-307-309 (1920).
- B. P. Epps. "An impulse framework for hydrodynamic force analysis: fish propulsion, water entry of spheres, and marine propellers." PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- J. A. C. Falcao de Campos. "Hydrodynamic power optimization of a horizontal axis marine current turbine with a lifting line theory." 17th International Offshore and Polar Engineering Conference. Lisboa, Portugal, Julio 2007.
- M.J. Khan, G. Bhuyan, M.T. Iqbal, J.E. Quaiçoe. "Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review." *Applied Energy*, n° 86 (2009): 1823-1835.
- Y. Kikuchi, H. Kato, H. Yamaguchi y M. Maeda. "Study on a supercavitating foil." *Second International Symposium on Cavitation*, Tokyo, Japón (1994): 127-132.
- K.D. Lee, S. Eyi. "Aerodynamic design via optimization." En *17th ICAS Proceedings* n° 2 (1990): 1808-1818.
- D.H. Menéndez Arán. "Hydrodynamic optimization and design of marine current turbines and propellers." Master's thesis. University of Texas at Austin, 2013.
- O. Rutgersson. "Supercavitating propeller performance." *Publication of SSPA*, 82, 1979.
- M.P. Tulin. "Supercavitating flows – small perturbation theory." *Journal of Ship Research*, n° 7(3) (1964): 16-37.
- W. Xu, S. A. Kinnas. "Performance prediction and design of marine current turbines in the presence of cavitation." *Transactions. SNAME*, 2010.

15

Aportes metodológicos para controlar la eficiencia energética desde el lado de la oferta y la penetración de fuentes primarias de energías renovables en sistemas de distribución eléctrica

Pérez Eduardo Andrés, Gustavo Alejandro
Schweickardt, Fernando Nicchi

Grupo GEA FIUBA-Grupo GIECRRER UTN FRCU

Resumen

Mucho se ha hablado y publicado sobre lograr la Sustentabilidad Energético/Ambiental en el corto plazo, de hecho se ha declarado el pasado año 2017 como el “año de las energías renovables”, donde se pretende aplicar al Sector Energético en general, pero el particular interés es el vinculado a la etapa de distribución de energía eléctrica, en donde la problemática a resolver no solo está relacionada con el empleo de tecnologías que permitan un proceso de inserción de fuentes primarias de energía renovables, sino que la problemática a solucionar actualmente está dado en el Marco Regulatorio que nos rige por la Ley del Mercado Eléctrico 24065.

Actualmente y siguiendo el nuevo enfoque de la Teoría Económica de Regulación, sustentada en los aportes del paradigma Neo-Clásico, en la Provincia de Entre Ríos se está trabajando en base a un Decreto Reglamentario de Micro-generación, para establecer las pautas técnicas que la distribuidora deberá permitir para facilitar la conexión de equipamientos de generación de fuentes de energía renovables a sus redes.

Una nueva figura o actor surge en el mercado eléctrico en su etapa de distribución denominado usuario pequeño-generador, que en su interacción con la distribuidora no deberá afectar su condición de usuario del servicio público de distribución de energía eléctrica y al cual se le aplica derechos y obligaciones que conforman el actual marco regulatorio. Pero un aspecto crítico en esta etapa; es que la distribuidora procederá a la habilitación de la micro-generación, previo pago del “derecho de conexión para Usuario pequeño - generador” lo que genera una adecuación de los alcances de ambos lados sin generar cambios drásticos en la actual normativa.

Introducción

El presente trabajo, constituye una versión simplificada de un capítulo de la tesis doctoral y es donde sintéticamente se presenta la formulación del problema de asignación de los costos de distribución que implicaría la inserción de energías renovables proveniente de un usuario que ha tomado la decisión de subir energía a la red de distribución de una empresa prestadora de servicio que se encuentra explotando; comercializando desde hace años y en forma regulada el suministro de energía eléctrica, todo esto de acuerdo a un marco económico propiciado por el paradigma marginalista. Con la formulación se busca investigar la forma de lograr que los beneficios que pueda obtener el usuario-generador acompañe a las fluctuaciones tarifarias de cada año dentro del periodo quinquenal y obtener el óptimo beneficio traducido en dos conceptos a mencionar:

- 1- Un derecho de conexión, dado que la empresa distribuidora permitirá el libre acceso a terceros, tal como lo dictamina la ley del Mercado Eléctrico 24065, pero el usuario debe asumir un costo destinado a preservar la calidad de energía que ingrese a las redes y que es exigido por el ente regulador a la distribuidora.
- 2- El contexto donde se realiza esta investigación estará dominado por incertidumbres que se pueden clasificar según Keynes en tres tipos:
 - Incertidumbres de probabilidad
 - Incertidumbres de valor.
 - Incertidumbre fundamental.

La metodología propuesta, considera un entorno dinámico de decisión compuesta por variables que pueden tener, en general, cualquier tipo de incertidumbres, particularmente incertidumbre fundamental, la misma se presenta tanto en las condiciones de contorno que definen el problema como en las alternativas dinámicas de selección, impactando en el modelo y técnica de planificación propuesta.

Factores a tener en cuenta.

Para poder aplicar la metodología propuesta dentro de un entorno dinámico, tal como se ha mencionado en el punto anterior, se hace necesario identificar dos escenarios sobre los cuales se deberá trabajar para poder realizar un marco de investigación estable, donde determinadas cuestiones puedan ser omitidas sin incurrir en errores que puedan influir en el resultado final, estos dos escenarios a saber son:

- 1- **Optimización operativa de empresa de servicio:** lograr esta optimización permitirá asegurar el abastecimiento de energía eléctrica por parte de la distribuidora cumpliendo con las condiciones de calidad adecuadas impuestas mediante el reglamento de suministro, lo que implica mantener sus instalaciones en condiciones óptimas; mejorar la calidad del gerenciamiento seleccionando sus inversiones en base a criterios que incluyan la calidad; extremar sus esfuerzos para que la calidad de la atención comercial a los usuarios resulte satisfactoria.
- 2- **Adaptabilidad de la empresa de servicio a las condiciones del mercado:** una vez realizadas las acciones de optimización operativas, es necesario realizar un análisis sobre la situación de nuestro sistema eléctrico a partir de su formación, mediante la sanción de la ley 24065, en el mes de diciembre del año 1991.

Un estudio completo, sin duda significaría caer en la redundancia debido a la gran cantidad de variables que intervienen, se centra la atención sobre aquellas de carácter distorsivo y considerarlas como preponderantes. Las dos variables siguientes son las que se proponen, debido al alto impacto social y económico que tienen asociado:

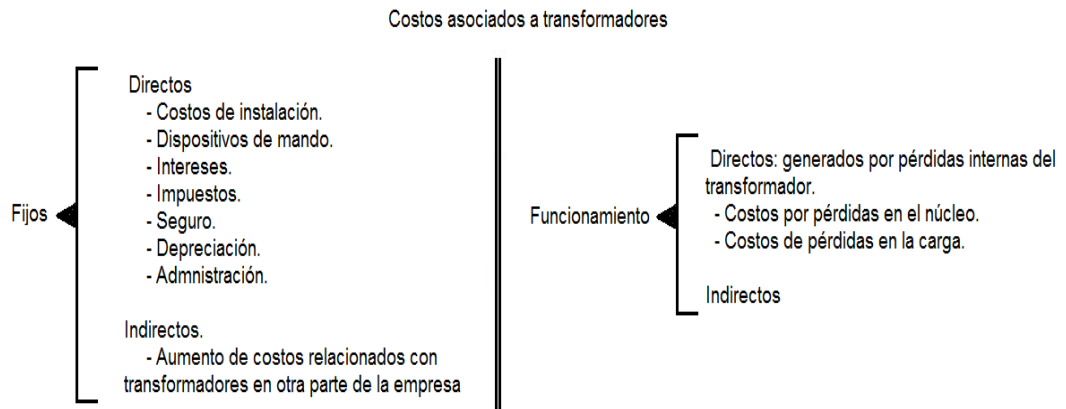
o Pérdidas técnicas: Son las que se producen a causa del hecho físico que constituye la circulación de corriente eléctrica y la presencia de tensión en las redes. Principalmente por efecto Joule.

Las pérdidas más preponderantes son las pérdidas en el núcleo de un transformador que se puede calcular de la forma siguiente:

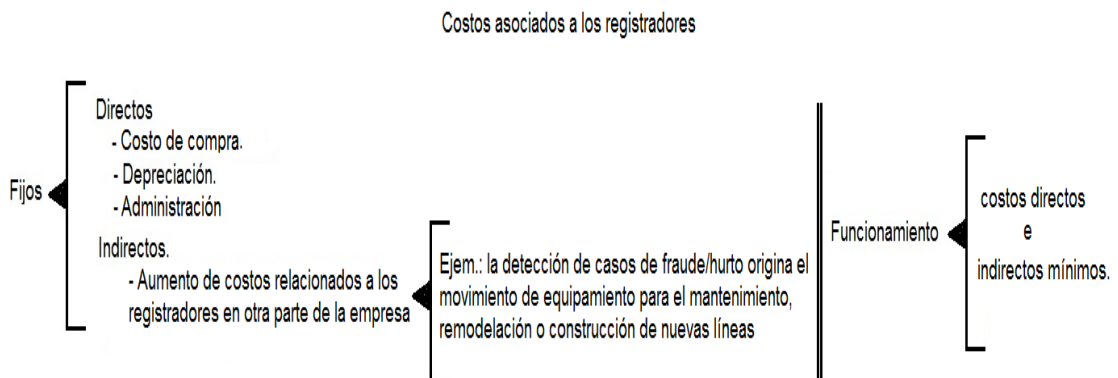
$$P_{an \text{ NUCLEO}} = \left[\frac{\text{pérdidas en el núcleo en KW}}{\text{núcleo en KW}} \right] \times \left[24 \frac{hs}{\text{día}} \times 365 \frac{\text{día}}{\text{año}} \right]$$

$$P_{an \text{ NUCLEO}} = \left[\frac{\text{pérdidas en el núcleo en KW}}{\text{núcleo en KW}} \right] \times \left[8760 \frac{hs}{\text{año}} \right] \Rightarrow P_{an \text{ NUCLEO}} \left[\frac{\text{KWh}}{\text{año}} \right]$$

Estas pérdidas originan la siguiente estructura de costos:



o Perdidas no técnicas: Están constituidas por la energía efectivamente suministrada pero no-medida, o bien no registrada comercialmente debido a fraude; robo o hurto de energía; errores de facturación; errores de lectura durante las mediciones; etc. Estas pérdidas originan la siguiente estructura de costos:



El planteo de un modelo que permita la valorización de estas variables de difícil tratamiento, además de la realización de una planificación al corto y mediano plazo, permitirá la obtención de un escenario estable que permita insertar al usuario-generador en condiciones reglamentarias acordes y acompañadas de una metodología teórica debidamente fundamentada.

Problemática Actual

Hasta la sanción de la Ley N° 24.065 en 1991, el sector eléctrico argentino operaba en un esquema de integración vertical en empresas de propiedad pública. La reforma en la industria eléctrica en las últimas tres décadas, ha implicado una transformación sustancial respecto de su tradicional esquema, verticalmente integrado hacia una estructura horizontal donde se conciben segmentos funcionalmente independientes (Generación, Transmisión y Distribución-Comercialización) vinculados a entornos de negocios en los que intentan establecerse condiciones de mercado. En aquellos segmentos donde puede tener lugar, se plantea un marco de competencia mediante la participación de múltiples agentes oferentes de servicios. En los que no, se aplica regulación, soportada en diferentes mecanismos.

La gráfica siguiente muestra como es la conformación actual de Mercado Eléctrico Mayorista (M.E.M. por sus siglas) y las distintas asociaciones que las nuclean:



Figura 1

En la figura siguiente se presenta el esquema de regulación del sector Eléctrico argentino, con los actores participantes. Adicionalmente se le agrega el Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE) y la Secretaría De Energía. Respecto a la segmentación Vertical de la Cadena de Producción: en el ámbito del segmento de distribución, existe una separación entre el servicio de redes y el de comercialización de energía eléctrica. El servicio de redes constituye un monopolio natural no disputable y, por lo tanto, sujeto a regulación; en consecuencia, existirá un único propietario o incumbente del sistema de redes que ofertará tal servicio.

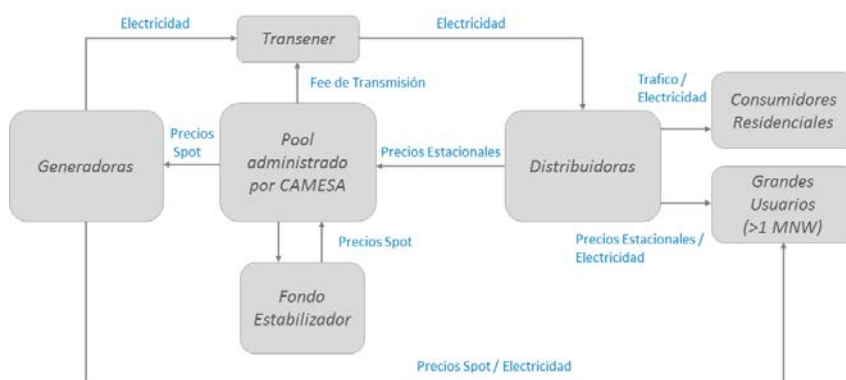


Figura 2

Con la adecuada separación contable de las prestaciones, podrá el monopolista ser oferente del servicio de energía (rol referido como comercializador no especializado), ya sea a clientes/usuarios cautivos o bien a clientes/usuarios elegibles, dependiendo de los ámbitos de mercado que el esquema regulatorio vigente permita. Dentro de los clientes elegibles, se consideran los comercializadores especializados y los generadores distribuidos conectados a la red.

Nuevo paradigma.

Adicionalmente, se ha introducido en el debate del Sector Energético el empleo de tecnologías que permitan el acceso a redes de fuentes primarias de energía renovables. La denominada Eficiencia Energética (de aquí en adelante EE) exhibe el mayor impacto positivo, seguida de la explotación de ciertas fuentes primarias de energías renovables (hidráulica, eólica y solar fotovoltaica que son las predominantes y a su vez, dependiendo de cada país y región). La 'EE del Lado de la Demanda' supone un cambio de paradigma en los hábitos de consumo de los usuarios del servicio eléctrico, así como la introducción permanente de mejoras tecnológicas que aumenten la eficiencia de los equipos y aparatos electrodomésticos. El enfoque del Control Regulatorio propuesto responde, en este contexto, tres razones fundamentales: a) La inercia inherente al cambio cultural que supone la EE del Lado de la Demanda, b) La existencia de niveles de pérdidas muy por encima de los estándares, debido a la falta de inversión e instrumentos que simetricen la relación Regulador-Regulado (problema central en la Teoría Económica de Regulación), y c) La necesidad de emplear, en la medida que la Sustentabilidad Energético/Ambiental lo permita y se disponga de ellas, fuentes primarias de energía renovable, bajo la forma de Generación Distribuida.

De lo anteriormente mencionado, el nuevo escenario se ve modificado, cuando el usuario que recibe energía eléctrica en su etapa de distribución cuenta con un equipo generador de energía renovable, supongamos el caso de paneles solares fotovoltaicos y demás accesorios, quien puede generar su propia energía con dos finalidades siguientes:

- { Ahorro de energía
- { Generar y subir energía a la red

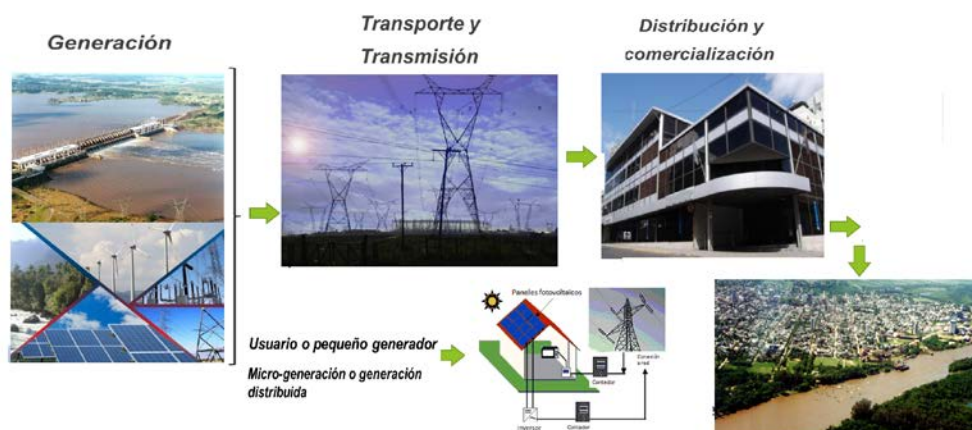


Figura 3

Cuando este usuario decide generar energía es donde comienza a gestarse el concepto de usuario pequeño generador y al mismo tiempo un nuevo actor del Mercado Eléctrico, por

diferencia de capacidad generatriz es que la actividad que desarrollará es la micro-generación y como se encuentra situado en la etapa de distribución es que ejercerá la generación distribuida y a la vez será tratado como todo generador con libre acceso a redes tal y como dispone la Ley del Mercado Eléctrico 24065.

Antecedentes legales.

Los antecedentes legales en energías renovables que acompañan a la ley 24065 de “Energía eléctrica”; es la ley 26.190 “Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica”, sancionada en Diciembre 6 de 2006 y promulgada de Hecho en Diciembre 27 de 2006; su modificatoria Ley 27191 “Ley 26190. Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Modificación.”, sancionada en Setiembre 23 de 2015 y promulgada de Hecho el 15 de Octubre de 2015 y el Decreto 531/2016 “Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica” donde se reglamenta la Creación del Fondo Fiduciario para el Desarrollo de Energías Renovables (FODER); se establece la Contribución de los Usuarios de Energía Eléctrica al cumplimiento de los objetivos del Régimen de Fomento; y se incluye la Regulación del Acceso y Utilización de Fuentes Renovables de Energía.

Lo anteriormente mencionado, en la provincia de Entre Ríos se cuenta con el Decreto Provincial Nº 4315 donde se define la figura del Usuario – Pequeño generador considerado como tal hasta un límite impuesto por una Potencia contratada < 50KW.

Para comenzar a reglamentar a este nuevo actor del mercado, es que se tienen en cuenta dos disposiciones que surgen por cuestiones naturales y obvias de un servicio que viene funcionando bajo un esquema regulado impuesto por ley desde el año 1991. Estas disposiciones se las puede clasificar en:

- Disposiciones de índole Técnicas:*
- Calidad de suministro sea acorde con los estándares de la distribuidora*
- (Reglamento de suministro, impuesto por el Ente Regulador)*
- Disposiciones de índole Reglamentarias:*
- Estar encuadrado dentro de un segmento del cuadro tarifario.*
- Clasificado según la potencia contratada*

- Disposiciones de índole técnicas.

Algunas de las disposiciones a cumplir por el usuario-pequeño generador:

- o Protección y maniobra: a la salida de la medición y en el tablero principal, la instalación deberá contar con dispositivos de protección y maniobra adecuados a la capacidad y características del suministro.
- o “Reglamentación para la Ejecución de Instalaciones Eléctricas en Inmuebles” AEA 90364 de la Asociación Electrotécnica Argentina.
- o Deberá contar con interruptor automático de desconexión para brindar protección contra: Sobretensión; Subtensión; Sobrefrecuencia o máxima frecuencia; Subfrecuencia o mínima frecuencia.

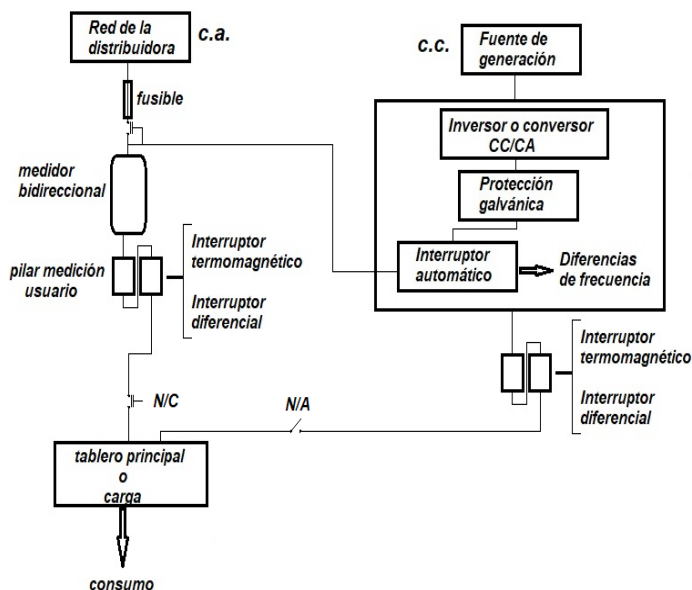


Figura 4: Instalación propuesta.

- Disposiciones de índole reglamentarias.

Algunas de las disposiciones a cumplir por el usuario-pequeño generador:

El nivel de potencia permitido queda establecido en dos categorías:

- o Pequeñas potencias: potencia menor a 10 KW. Tensión monofásica o trifásica,
- o Medianas potencias: rango igual o mayor a 10 KW y menor a 50 KW. Tensión trifásica.
- o La capacidad instalada permitida a cada usuario pequeño – generador que desee conectar su equipamiento de generación a una red de distribución estará sujeta a las limitaciones respecto del punto de conexión (Potencia instalada y autorizada para el suministro).
- o La medición de energía eléctrica de un usuario pequeño - generador se llevará adelante a través de un sistema de medición de energía y potencia.
- o La solicitud usuario pequeño - generador podrá ser objeto de observaciones por parte de la distribuidora, las que deberán ajustarse a los requisitos exigidos en el “Reglamento de suministro”.
- o El usuario pequeño – generador deberá acreditar que el equipamiento de generación fue instalado por profesional o empresa debidamente habilitada.

Referencias

[1]: ley 24065 de “Energía eléctrica”.

[2]: ley 26.190 “Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica”.

[3]: Ley 27191 “Ley 26190. Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Modificación.”

[4]: Decreto 531/2016 "Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica".

[5]: Decreto Provincial N° 4315.

[6]: Una Metodología De Regulación Del Sector Eléctrico Argentino. Análisis Y Criterios Para Propiciar La Eficiencia Energética Desde El Lado De La Oferta. Autores: Ing. Camargo Federico. Ing. Casanova Carlos. Ing. Eduardo Pérez.

16

Dinámica de suspensiones concentradas sometidas a vibración mecánica

Barba Maggi Diego Guillermo^{1,2}, Piva Marcelo¹,
Boschan Alejandro¹ y Martino Román¹

¹ Grupo de Medios Porosos FIUBA – ARGENTINA

² Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH – ECUADOR

Resumen

La organización espacial de partículas en estructuras ordenadas en un sustrato, viene siendo de gran interés en los últimos tiempos a nivel mundial, dada su utilidad en la manufactura de diferentes tipos de materiales, tanto inorgánicos como orgánicos, así como en la síntesis de tejidos y películas utilizadas en una amplia variedad de aplicaciones de la industria y la tecnología; por ejemplo tejidos orgánicos funcionales a través de células madre, regeneración de huesos, materiales de alta resistencia mecánica, recubrimientos para paneles solares, membranas coloidales. La tesis planteada al ser experimental en su totalidad, donde la vibración es el mecanismo de generación de esfuerzos cortantes, fue dividida en tres grupos; primero en una celda cilíndrica con resultados orientados a la formación de films de partículas localizadas espacialmente con la evidencia de las ondas que lo provocan, segundo en una celda cuasi 2D que evidenció la interacción entre las partículas sedimentarias y los flujos secundarios provocados por la inestabilidad de Faraday en la superficie del líquido, se encontraron y caracterizaron las zonas de resuspensión, iniciación y ausencia de movimiento granular, y finalmente, con sustratos consolidados con una rugosidad y permeabilidad predefinida, evidenció la modificación del umbral de aparición de la inestabilidad de Faraday.

Introducción

Las suspensiones de partículas están presentes en numerosas situaciones industriales relacionadas, por ejemplo, con las industrias farmacéutica (jarabes), cosmética, de la pinturas (recubrimientos), petrolera (lodos de perforación y agentes de sostén) y alimenticia (salsas, yogures, entre otras). Se trata de mezclas heterogéneas formadas por partículas sólidas no solubles de tamaño característico igual o mayor que $1\ \mu\text{m}$ que se dispersan en un medio líquido. Debido al largo alcance de las interacciones hidrodinámicas entre partículas, las propiedades mecánicas de las suspensiones suelen ser mucho más

complejas que la de los líquidos puros [MUELLER 10]. En particular se ha observado que la formación de microestructuras en el seno de una suspensión tiene efectos significativos en las propiedades reológicas de la misma [OVARLEZ 06].

Bajo ciertas condiciones, las partículas de la suspensión sedimentan, depositándose en el fondo del recipiente en patrones geométricos bien ordenados. Actualmente existe un interés en el estudio de estos patrones por sus potenciales aplicaciones como sustratos para el crecimiento y regeneración de tejidos orgánicos [SERPOOSHAN 17]

Cuando el recipiente contenedor de un fluido se somete a una vibración vertical con una amplitud y frecuencia determinada aparecen ondas en la superficie libre del líquido contenido, por ejemplo ondas armónicas que viajan desde los bordes del contenedor hacia el centro del mismo, ondas subarmónicas conocidas como ondas de Faraday, el fenómeno que aparece es debido a la competencia entre la inercia del líquido y la tensión interfacial [FARADAY 1831]. En nuestro caso se modifica sensiblemente cuando el líquido se reemplaza por una suspensión de partículas.

Una dificultad del estudio con suspensiones de partículas sedimentables proviene de los acoplamientos no evidentes entre la morfología de los patrones sedimentarios y las ondas que los provocan. Por este motivo resultó conveniente estudiar el problema en tres grupos experimentales.

La primera línea de investigación tuvo como objetivo controlar el ensamblado de partículas microscópicas en arreglos estructurados a través de plantillas de base líquida, se estudiaron experimentalmente los patrones de deposición de suspensiones de partículas sometidas a vibración mecánica, en un reservorio de forma cilíndrica. Se utilizaron partículas macroscópicas de tamaño característico $40 \mu\text{m}$ y densidad $\rho = 1.05 \text{ g/cm}^3$, esféricas, y de alta monodispersividad. Se analizó la influencia del fluido portador (agua con glicerina), de la fracción volumétrica de las partículas y de la frecuencia de vibración, en la morfología de dichos patrones. Utilizando una técnica fotométrica se midieron los espesores locales del patrón depositado. En la Figura. 1 se muestra el dispositivo experimental para las experiencias.

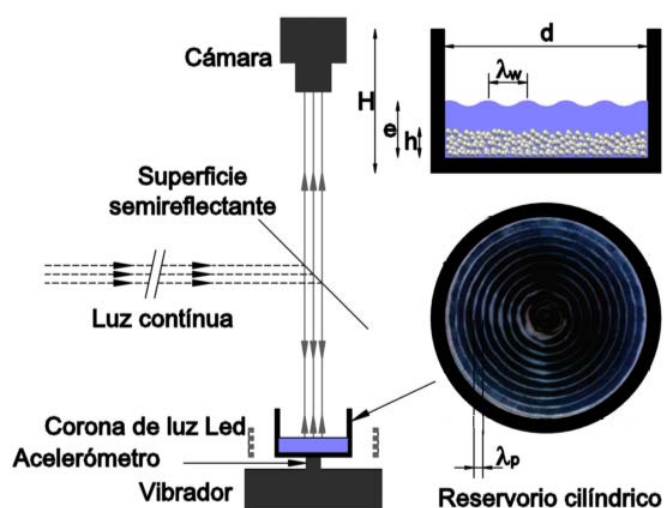


Figura. 1: Dispositivo experimental para experiencias con sustrato no consolidado – celda cilíndrica

En la Tabla 1. Se presenta un resumen de los datos experimentales para las experiencias en la celda cilíndrica.

Tabla 1. Datos experimentales – celda cilíndrica		
Definición	Nombre	Valor
Frecuencia de vibración	f [Hz]	Entre 50 y 100
Aceleración	Γ [g]	Entre 1 y 3
Espesor de la capa de fluido	e [cm]	0.188
Densidad del fluido	ρ_f [g/cm ³]	1.018
Viscosidad cinemática	ν [cm ² /s]	0.01121
Viscosidad dinámica	μ [Pa.s]	0.0011416
Tensión interfacial del fluido	T [Dina/cm]	45
Densidad de las partículas	ρ_p [g/cm ³]	1.05
Radio de las partículas	a [mm]	20
Fracción volumétrica	Φ	0 a 10%
Diámetro del reservorio	d [cm]	7.8
Altura del reservorio	H [cm]	4.5

La segunda línea de investigación de la tesis tuvo como objetivo estudiar la interacción entre los flujos secundarios producidos por la Inestabilidad de Faraday y el lecho granular no consolidado en el fondo del recipiente. Para ello se diseñó y construyó un recipiente estrecho (celda cuasi 2D) formado por dos placas de acrílico paralelas ubicadas a 1.8mm de separación, montadas sobre un marco rígido. El registro de las imágenes se efectuó mediante una cámara rápida. El recipiente se montó sobre el eje del vibrador que recibe la señal desde un generador de funciones. Las partículas utilizadas fueron de 40 μm , 140 μm y 250 μm de tamaño característico, esféricas, de densidad $\rho = 1.05 \text{ g/cm}^3$. Como fluido portador, se utilizó una mezcla controlada de etanol con glicerina. La frecuencia f de excitación se varió entre 18Hz y 42 Hz, mientras que la aceleración $\Gamma = A\omega^2$ (donde A y ω son la amplitud y la frecuencia angular de excitación definida como $\omega = 2\pi f$ respectivamente) varía en función a la amplitud de excitación A impuesta desde el generador de funciones, y Δh , es la altura del fluido sobrenadante a las partículas sedimentadas. Inicialmente, la interface entre partículas y fluido es plana. El estudio se concentró en la modulación de la interface del fondo de sedimentos, como indicador del movimiento de partículas. A partir de ello se obtuvieron los umbrales de iniciación de movimiento para un amplio rango de parámetros. En la Figura. 2 se muestra el dispositivo experimental para las experiencias.

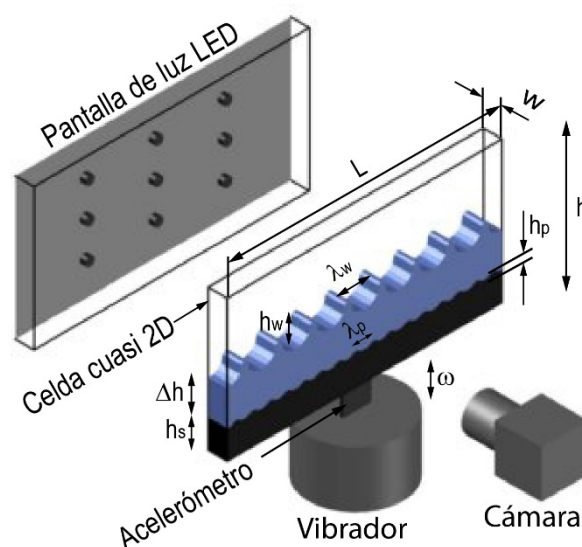


Figura. 2: Dispositivo experimental para experiencias con sustrato no consolidado – celda Cuasi 2D

En la Tabla 2. Se presenta un resumen de los datos experimentales para las experiencias en la celda cuasi 2D.

Tabla 2. Datos experimentales – celda cuasi 2d		
Definición	Nombre	Valor
Frecuencia de vibración	f [Hz]	Entre 14 y 42 Hz
Aceleración	Γ [g]	Entre 1 y 4
Espesor de la capa de fluido sobrenadante	Δh [cm]	Entre 0.1 y 1.2
Densidad del fluido	ρ_f [g/cm ³]	0.869
Viscosidad cinemática del fluido	ν [cm ² /s]	0.03495
Viscosidad dinámica del fluido	μ [Pa.s]	0.003037
Tensión interfacial del fluido	T [Dina/cm]	22.5
Densidad de las partículas	ρ_p [g/cm ³]	1.05
Radio de las partículas	a [μ m]	20, 70, 125
Altura de la capa de partículas	h_s [cm]	1
Separación entre placas del recipiente	w [cm]	0.18
Longitud del recipient	L [cm]	15
Altura del recipiente	H [cm]	7.5

La tercera línea de investigación de la tesis apuntó a entender la interacción entre las ondas en la superficie y el fondo rugoso resultante de la deposición de partículas sedimentadas que además es poroso, se acondicionó una celda que permite simular la rugosidad y permeabilidad del fondo de forma controlada. Las experiencias se llevaron a cabo en un reservorio de forma rectangular, para el estudio se utilizaron diferentes fondos rugosos fabricados en malla de acero inoxidable de tamaños predeterminados. Así, la rugosidad se estima a partir del tamaño de los orificios de la malla y el diámetro del alambre de acero. Se empleó como fluido un aceite de siliconas de viscosidad 20cSt, se estudió la influencia de la rugosidad en el umbral de aparición de la inestabilidad. Para ello, se varió la aceleración de la vibración para diferentes valores de la frecuencia de vibración. Utilizando una técnica de visualización reflectométrica, iluminando con luz estroboscópica se observó el patrón de Faraday resultante y se midió como varía la longitud de onda para diferentes fondos rugosos. Se exploró el fenómeno para el rango de frecuencias comprendido entre 28Hz y 42Hz. Varios estudios [BARBA MAGGI 18, FENG 16] sugieren que el umbral de la inestabilidad se retrasa para valores crecientes de rugosidad del lecho. Sin embargo, el tema sigue siendo objeto de intensa investigación y debate. En la Figura. 3 se muestra el dispositivo experimental utilizado en las experiencias.

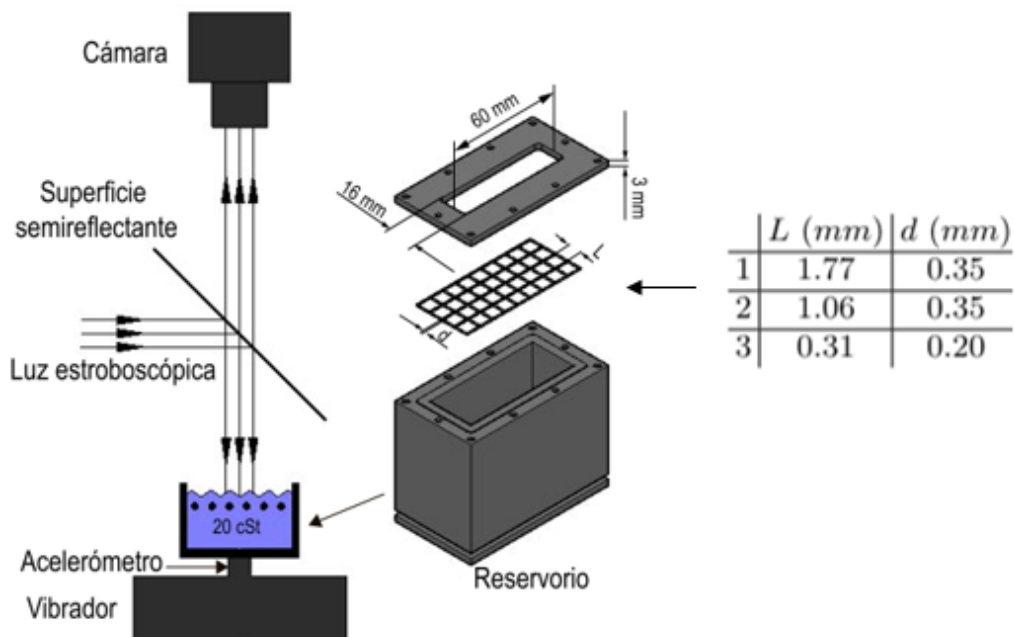


Figura. 3: Dispositivo experimental para experiencias con sustrato consolidado

Resultados

Se presentan algunos resultados cualitativos, los resultados cuantitativos serán presentados en el escrito final de la tesis doctoral.

1. Experiencias en la celda cilíndrica

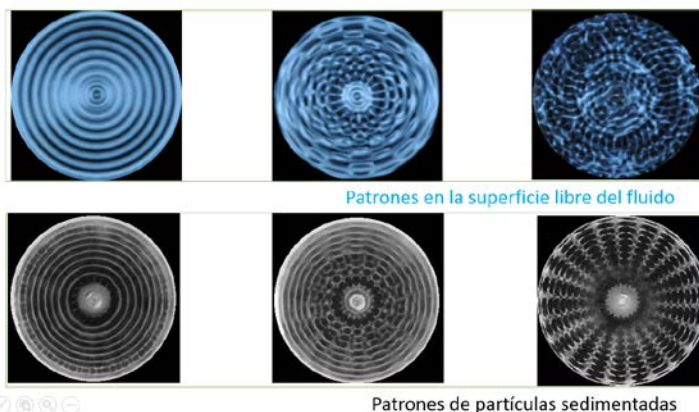


Figura. 4: Estructuras de flujo y de partículas obtenidas en las experiencias con sustrato no consolidado en la celda cilíndrica.

Se observa que existe una relación directa entre los patrones en la superficie libre del líquido y el patrón de partículas sedimentado, estudiamos y caracterizamos la fenomenología en un reservorio de forma cilíndrica.

2. Experiencias en la celda cuasi 2D

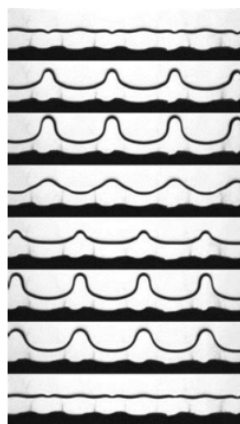


Figura. 5: Ciclo de la Inestabilidad de Faraday. Se evidencia la interacción entre los flujos secundarios y el medio granular inicialmente sedimentado.

La interacción entre los flujos secundarios generados por la inestabilidad de Faraday en la superficie libre del líquido interactúan con las partículas sedimentadas, generando en ciertas condiciones la iniciación de movimiento granular, e inclusive llegando a resuspender las partículas inicialmente sedimentadas. Observamos que las partículas siguen un patrón y tienden a localizarse en las zonas de bajo corte (nodos de la vibración).

3. Experiencias con sustratos consolidados

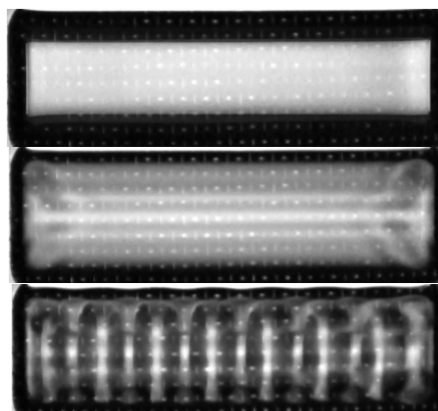


Figura. 6: Superficie libre de fluido según lo observado por la cámara.

En la figura se observa arriba el fluido en reposo. En el medio las ondas superficiales con el vibración encendido y una aceleración por debajo del umbral de la Inestabilidad de Faraday. Abajo las ondas de Faraday al umbral de la Inestabilidad. La textura de la malla subyacente es visible (puntos brillantes).

Conclusiones

- Fue posible localizar las partículas utilizando las plantillas líquidas sometidas a vibración mecánica en un reservorio de forma cilíndrica.
- Variando ciertos parámetros físicos del sistema se puede controlar los arreglos de partículas.
- Se caracterizó la correlación entre las estructuras de la superficie libre del líquido y los arreglos de partículas en una celda cuasi 2D.

- Se estudiaron las condiciones de iniciación de movimiento de las partículas en una celda cuasi 2D.
- Se evidenció que el umbral de aparición de la inestabilidad de Faraday resulta sensiblemente modificado con la presencia de sustratos rugosos y permeables en el fondo de un contenedor.

Referencias

- [BARBA MAGGI 18] Barba Maggi, D., Boschan, A., Martino, R., Piva, M., Géminard, J., "Faraday waves over a permeable substrate", *Enviado a: Physical Review E*, (2018)
- [FARADAY 1831] Faraday, M., "On a peculiar class of acoustical figures; and on certain forms assumed by groups of particles upon vibrating elastic surfaces", *Philos Trans R Soc B* 121:299–340 (1831)
- [FENG 16] Feng, J., Jacobi, I. and Stone, H., "Experimental investigation of the Faraday instability on a patterned surface", *Experiments in Fluids*, 57:86 (2016)
- [MUELLER 10] S. Mueller, E. W. Llewellyn And H. M. Mader, "The rheology of suspensions of solid particles", *Proc. R. Soc. A* 466, 1201–1228. (2010)
- [OVARLEZ 06] Ovarlez, G., Bertrand, F., Rodts, S., 2006. Local determination of the constitutive law of a dense suspension of noncolloidal particles through magnetic resonance imaging. *Journal of Rheology* 50 (3), 259–292
- [SERPOOSHAN 17] Serpooshan, V., Chen, P., Wu, H., Lee, S., Sharma, A., Hu, D., "Bioacoustic-enabled patterning of human iPSC-derived cardiomyocytes into 3D cardiac tissue", *Biomaterials* 131: 47-57, (2017)

17

Control de separación no estacionaria a partir de líneas de emisión

Gisela Daniela Charó^{1,2}, Guillermo Artana^{1,2}
y Denisse Sciamarella^{3,4}

¹ Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Fluidodinámica (LFD). Buenos Aires, Argentina.

² CONICET. Buenos Aires, Argentina.

³ Institut Franco-Argentin d'études sur le climat et ses impacts (IFAECI). UMI 3351 (CNRS-CONICET-UBA).

⁴ CNRS. Francia.

Introducción

La detección de estructuras que organizan los flujos y de las regiones que encierran estas estructuras es fundamental para entender fenómenos naturales [0], como los patrones que encontramos en la naturaleza (Figura 1): la organización espacial de las larvas en los océanos, la distribución en forma de eddies de la clorofila, los patrones que dibuja la espuma en el mar, la dinámica de la atmósfera de Júpiter, la distribución de contaminantes, etc. Entender los mecanismos que los forman nos permite responder a cuestiones como por ejemplo: porqué hay islas de basura, hacia adónde van las boyas que arroja un barco en el océano o la forma que adquieren y la extensión de los derrames de petróleo.

Estudiar estos patrones no sólo es de suma importancia para entender las observaciones en la naturaleza sino como también problemas de la ingeniería: mezclado de diferentes fluidos, control de flujo, sembrado de partículas y protocolos de mezclado, es decir, cómo hacer que el mezclado de fluidos sea más eficiente.



Figura 1: (a) Derrame de petróleo, (b) Eddies de clorofila, (c) Espuma de mar y (d) Atmósfera en el planeta Júpiter [1].

El objetivo de mi trabajo de tesis es el de identificar estas regiones y estudiar sus propiedades dinámicas para poder ser capaz de comprender los patrones de mezclado en los flujos y así como también entender los fenómenos de transporte que suceden en estas regiones.

Formalmente, estas regiones se conocen con el nombre de Regiones coherentes a tiempo finito (Finite Time Coherent Sets , FTCS) [2] y los bordes de estas regiones son las Estructuras Coherentes Lagrangianas (Lagrangian Coherent Structures, LCS) [1].

Regiones y Estructuras Coherentes Lagrangianas.

Las estructuras coherentes lagrangianas (LCS) proveen un esqueleto simplificado de la dinámica del sistema, nos muestran las barreras de transporte entre regiones dinámicamente invariantes (FTCS) [2].

Estas estructuras tienen que estar objetivamente identificadas, es decir, se tienen que poder identificar sin importar el sistema de referencia que estemos usando (objetividad). Además tenemos que pedirle que tengan invarianza lagrangiana, es decir, que la estructura se mueva, cambie su forma, y que evolucione como lo hace el fluido. Hay mucha literatura que se enfoca en encontrar las LCS [1] y otra que se focaliza en hallar las FTCS: de manera probabilística [3], métodos basados en la ergodicidad del sistema [4] y métodos basados en trenzas topológicas [5].

Líneas de emisión

Una línea de emisión a tiempo T está formada por las partículas de fluido que pasaron a través de una ubicación determinada en el espacio x_0 entre el tiempo inicial t_0 y T . Se puede visualizar inyectado tinta en x_0 continuamente durante el intervalo de tiempo $[t_0, T]$. Esta línea de emisión puede no ser continua, pueden romperse. Cuando el lugar de inyección de la tinta está suficientemente bien elegido, constituye una forma de visualizar zonas donde la tinta no ingresa a los que llamaremos parches. Por lo tanto, podremos ver patrones.

Un ejemplo: Doble giro no autónomo.

Es un "toy model", que busca representar la dinámica de dos giros oceánicos adyacentes encerrados por continente.

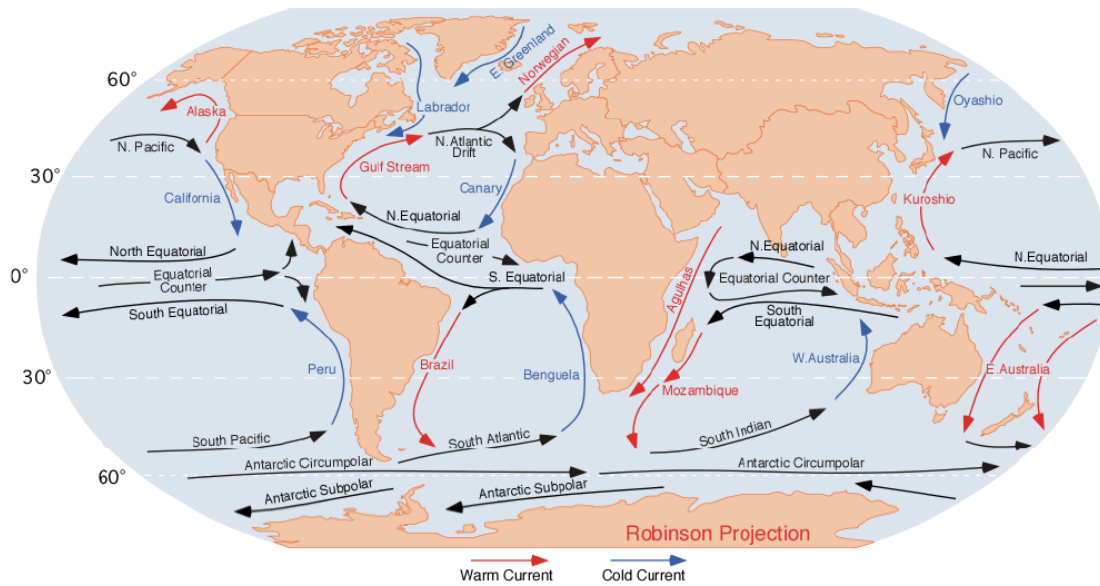


Figura 2: Esquema de las corrientes oceánicas [6], donde se pueden ver los giros oceánicos.

Ecuaciones del doble giro no autónomo:

Sea $x=(x_1,x_2)$, la posición de una partícula de fluido, ubicada en algún lugar del dominio $\Omega=[0,2] \times [0,1]$ y sea ψ la función corriente con parámetros $A=0.1$, $\epsilon=0.1$, $\omega=\pi/5$, se deriva el sistema de ecuaciones (1) que nos permite saber el valor del campo de velocidad del doble giro en cada instante, conociendo la posición de la partícula.

$$\psi(x_1, x_2, t) = A \sin(\pi f(x_1, t)) \sin(\pi x_2)$$

$$f(x_1, t) = a(t)x_1^2 + b(t)x_1$$

$$a(t) = \epsilon \sin(\omega t), b(t) = 1 - 2a(t)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -A\pi \sin(\pi f(x_1, t)) \cos(\pi x_2) \\ \frac{dx_2}{dt} = A\pi \cos(\pi f(x_1, t)) \sin(\pi x_2) \frac{\partial f}{\partial x_1} \end{cases}$$

Sistema de ecuaciones (1)

En la Figura 3, se puede observar el campo de velocidades del sistema a tiempo $t=0$. Se pueden observar los dos giros oceánicos como los que ocurren en el océano Pacífico.

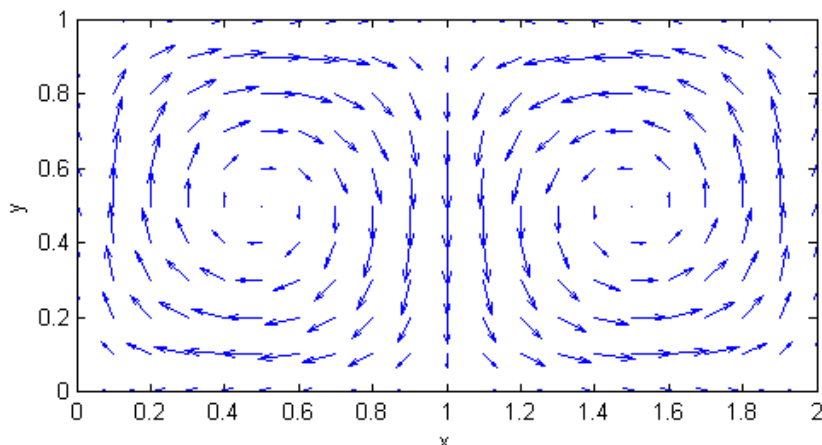


Figura 3: Campo de velocidad en $t=0$.

Resolviendo el problema de valores iniciales, es decir, integrando el sistema de ecuaciones (1) dada una condición inicial $x_0 = (x_{10}, x_{20})$, podemos encontrar la trayectoria de una partícula.

Si inyectamos tinta en la posición $x_0 = (1, 0.5)$, podemos ver en la Figura 4 como se va formando la línea de emisión a diferentes tiempos t , y también las roturas de la misma que se denotan con esas rectas que unen partículas contiguas.

Si se continúa inyectando tinta, la línea de emisión nos revelará patrones que aparecen en el sistema dinámico del flujo del Doble giro. En la Figura 5, se puede observar la línea de emisión a tiempo $t=3500$, y las zonas en donde la tinta no llega que forma parches triangulares y circulares.

Entonces es de esperar que las partículas que estén en los parches circulares no se mezclen con las partículas que están en los parches triangulares, que es lo que va a pasar, determinándose así que al no mezclarse las zonas las dinámicas de cada partícula sean distinguibles entre ella, o sea diferentes.

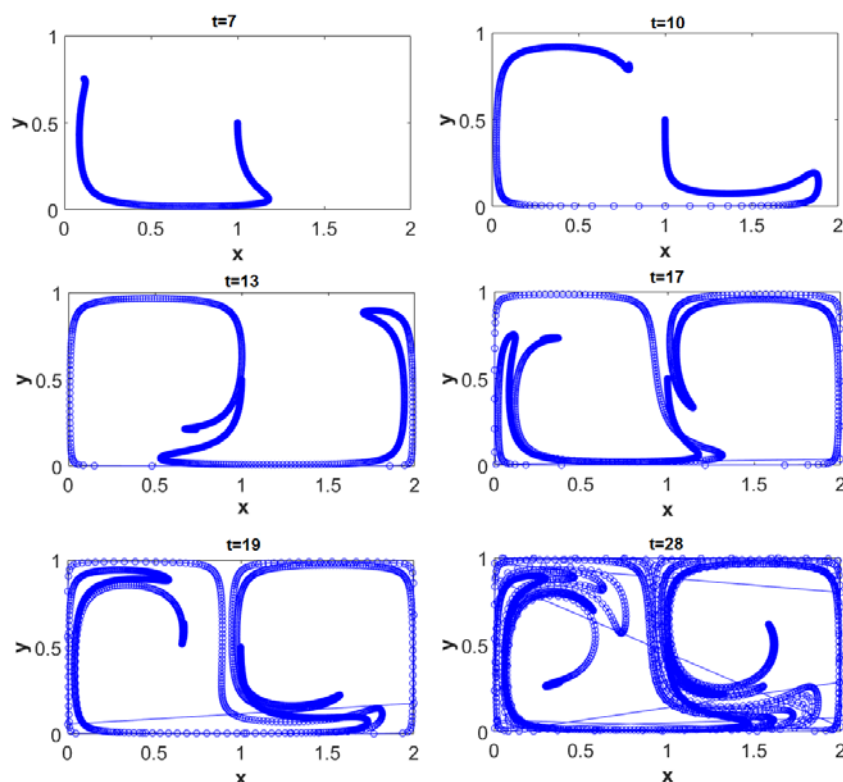


Figura 4: Roturas en la línea de emisión, las líneas rectas denotan la unión de dos partículas contiguas en el tiempo.

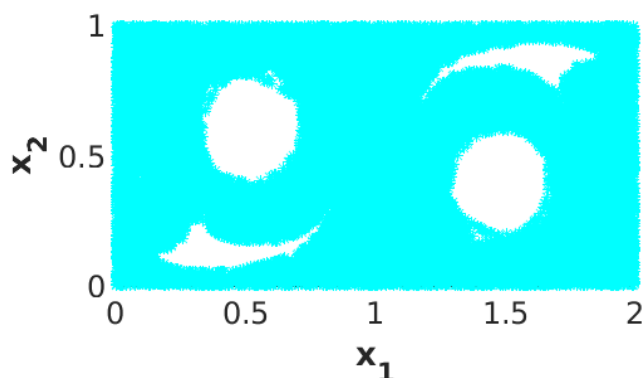


Figura 5: Patrones que se visualizan cuando observamos la línea de emisión a tiempo $t=3500$, sembrada en $x_0=(1,0.5)$.

Cuando estudiamos las trayectorias de partículas cuyas posiciones iniciales están en los parches circulares o triangulares, y en la zona adonde la tinta llega y analizamos las trayectorias de una manera especial, usando las herramientas de la topología, podemos clasificar la dinámica de cada región, es decir, vamos a encontrar los mecanismos que organizan las trayectorias. Esto se logra "mirando" a las trayectorias de una manera especial. Esta forma de tratarlas implica usar las herramientas de la topología.

Análisis topológico de series temporales

La topología es la rama de las matemáticas dedicada al estudio de aquellas propiedades de los cuerpos geométricos que permanecen inalteradas por transformaciones continuas (doblar, comprimir, estirar).

Los objetos que vamos a estudiar son los embebidos construidos con retardo temporal, es decir, vamos a desplegar una de las coordenadas de la trayectoria, en nuestro caso, x_1 , y la vamos a embeber en un espacio tridimensional.

$$(x_1(t), x_1(t - \tau), x_1(t - 2\tau))$$

Para caracterizar los mecanismos que organizan las trayectorias se van a usar los invariantes topológicos que son los grupos de homología que sirven para medir los "agujeros" de un objeto. Como estamos en 3 dimensiones, vamos a tener sólo 3 grupos de homología:

- H_0 que describe el número de componentes conexas, es decir, de cuántas partes no conectadas está formado el objeto o lo que es lo mismo cuenta la cantidad de agujeros de dimensión 0.
- H_1 que cuenta el número de ramas del objeto, es decir, la cantidad de ciclos no equivalentes o agujeros de dimensión 1.
- H_2 que cuenta el número de cavidades que encierra el objeto (agujeros de dimensión 2).

Por ejemplo, una esfera hueca en el espacio , tiene $H_0 \sim \mathbb{Z}$ (1 componente conexa), $H_1 \sim \mathbb{Z}$ (hay un sólo ciclo no equivalente , es decir una sola manera de recorrer al objeto) y $H_2 \sim \mathbb{Z}$ (encierra una cavidad).

Cuando analizamos las trayectorias del sistema del doble giro (Figura 6), encontramos tres tipos de trayectorias trayectorias topológicamente inequivalentes que vamos a denotar con los siguientes símbolos: (*), (Δ) y (o).

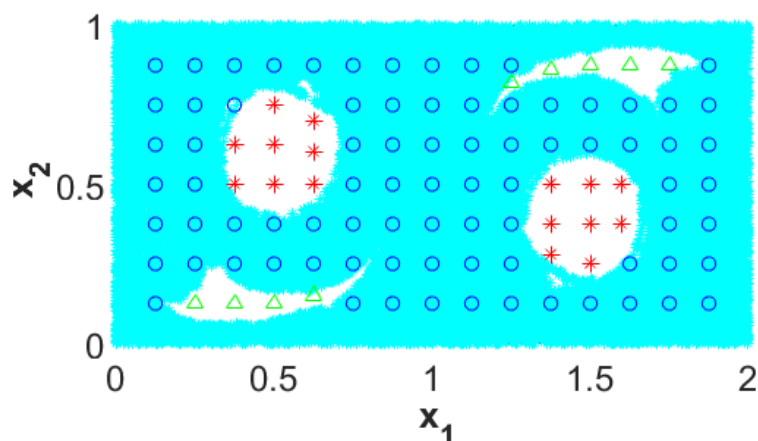


Figura 6: Disposición espacial de las tres clases de trayectorias topológicamente inequivalentes halladas en el sistema de doble giro.

En la Figura 7 se muestran las 3 clases de trayectorias correspondientes a partículas en : a) la zona de la tinta (o), que están coloreadas en azul (*), b) los parches circulares que están coloreadas en rojo (*) y c) los parches triangulares que están coloreadas en verde (Δ) . De igual manera en la Figura 8 se muestran las series temporales correspondientes a la coordenada x_1 de la trayectoria y, finalmente en la Figura 9 se encuentran los objetos tridimensionales, logrados gracias a los embebidos temporales.

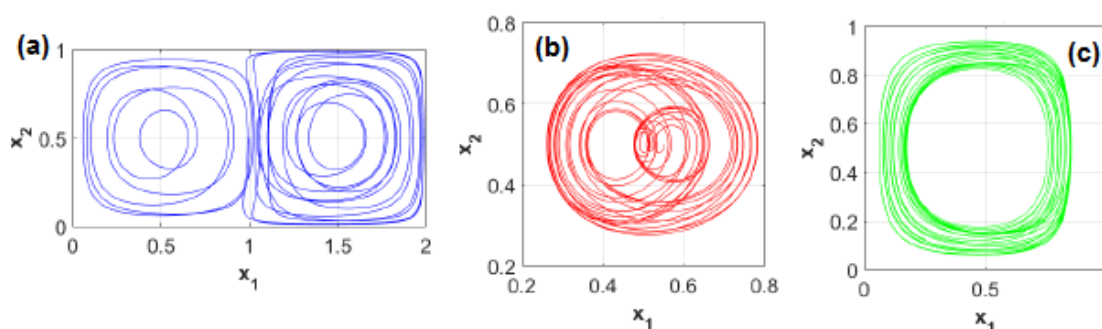


Figura 7: Trayectoria de partículas de la clase: (a) (o),(b) (*) y (c) (Δ).

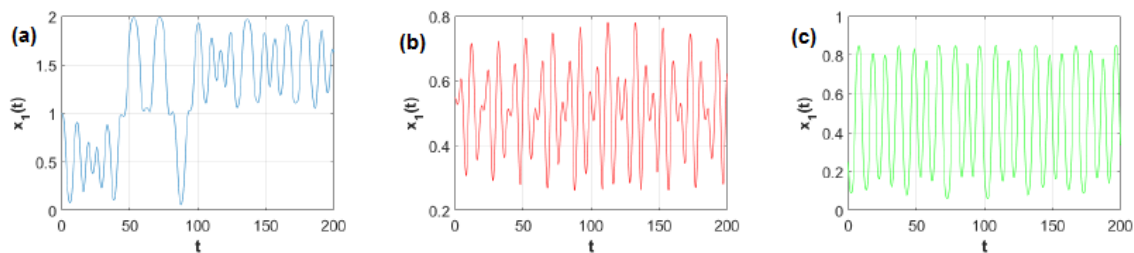


Figura 8:Series temporales $x_1(t)$ de partículas de la clase: (a) (o),(b) (*) y (c) (Δ).

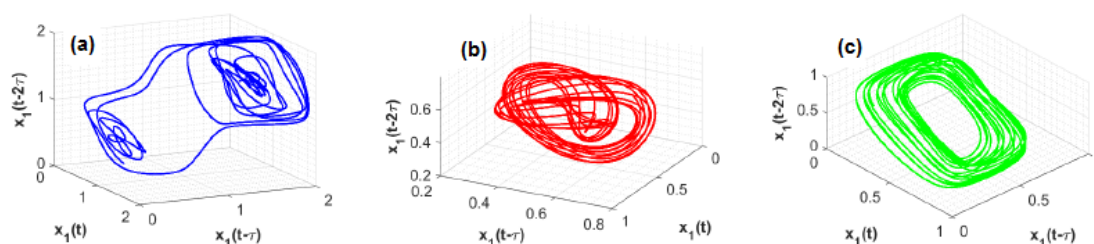


Figura 9:Embebido de partículas de la clase: (a) (o),(b) (*) y (c) (Δ).

A cada objeto tridimensional se le calcularon los grupos de homología siguiendo el trabajo de [7]. Como todos los objetos están constituidos por una sola componente, el grupo de homología en los tres casos es $H_0 \sim \mathbb{Z}$, y como ninguno encierra cavidad $H_2 \sim \{0\}$, pero los tres se diferencian en su grupo de homología H_1 . Se encontró que en el caso de las partículas de tipo (a) $H_1 \sim \mathbb{Z}^3$ (existen tres ciclos inequivalentes), en el caso (b) $H_1 \sim \mathbb{Z}^2$ (2 ciclos inequivalentes) y en el caso (c) $H_1 \sim \mathbb{Z}$ (1 ciclo inequivalente).

Conclusiones y trabajo futuro

Los invariantes topológicos, en el caso de los grupos de homología distinguen zonas con diferentes dinámicas en el espacio físico, en el caso del doble giro. Y la gran pregunta a considerar en mi tesis es la siguiente: ¿Será posible aplicar la teoría de análisis topológico de datos [8] para encontrar regiones como en el caso de la Figura 1?

Bibliografía

- [0] Peacock, T., & Haller, G. (2013). Lagrangian coherent structures: The hidden skeleton of fluid flows. *Physics today*, 66(2), 41-47.
- [1] Haller, G. (2015). Lagrangian coherent structures. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 47, 137-162.
- [2] Froyland, G., & Junge, O. (2015). On fast computation of finite-time coherent sets using radial basis functions. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 25(8), 087409.
- [3] Froyland, G., & Padberg-Gehle, K. (2014). Almost-invariant and finite-time coherent sets: directionality, duration, and diffusion. In *Ergodic Theory, Open Dynamics, and Coherent Structures* (pp. 171-216). Springer, New York, NY.

- [4] Budišić, M., & Mezić, I. (2012). Geometry of the ergodic quotient reveals coherent structures in flows. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 241(15), 1255-1269.
- [5] Allshouse, M. R., & Thiffeault, J. L. (2012). Detecting coherent structures using braids. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 241(2), 95-105.
- [6] Ghil, M. (2017). The wind-driven ocean circulation: Applying dynamical systems theory to a climate problem.
- [7] Sciamarella, D., & Mindlin, G. B. (2001). Unveiling the topological structure of chaotic flows from data. *Physical Review E*, 64(3), 036209.
- [8] Gilmore, R. (1998). Topological analysis of chaotic dynamical systems. *Reviews of Modern Physics*, 70(4), 1455.

18

Optimización de mezclado caótico en dispositivos microfluídicos con control de flujo a lazo cerrado

Gabriel Furtado Paes, Juan Martín Cabaleiro

Introducción

Durante últimos 20 años se han desarrollado una serie de empresas basadas en lab-on-a-chip, unidades capaces de realizar análisis, detección y generación de productos químicos o biológicos en volúmenes pequeños (del orden del nanolitro) en dispositivos con dimensiones características del orden de los micrómetros. En estas escalas los flujos se desarrollan con un número de Reynolds bajo -lo que significa que la mezcla se hace únicamente mediante la difusión y que los flujos son laminares- y número de Péclet alto -lo que significa que la difusión es ineficaz con comparación con la advección. A título de ejemplo, un canal tipo con longitud característica $L_c = 100 \mu\text{m}$, en el que se desarrolla un flujo de agua con una velocidad característica $U_c = 1 \text{ mm/s}$ tendrá un $Re = 0.1$ y un $Pe = 100$. El tiempo característico de mezclado por difusión será de $\tau_{mezcla} = 10 \text{ s}$, mientras que el tiempo de residencia característico será de $\tau_{resid} = 0.1 \text{ s}$. Lograr procesos que disminuyan los tiempos de mezclado homogéneo tiene un interés desde un punto de vista tecnológico. De hecho, la mezcla a bajo número de Reynolds se ha convertido en un problema fundamental que dio vida a un campo de investigación en sí mismo [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9] con flujos modelos como el doble gyre que sigue siendo el flujo patrón para comprobar la validez de distintas soluciones.

Las estrategias para optimizar el mezclado se dividen principalmente en dos tipos: optimizar los términos de difusión, o añadir en el flujo términos de advección caótica. La primera solución involucra utilizar los parámetros de la ecuación de difusión (tiempo, distancia, gradiente). La segunda propone servirse de las propiedades del caos para mejorar el mezclado [10, 11, 12, 13, 14], como lo hace un flujo turbulento a número de Reynolds alto. En este proyecto nos interesamos en la optimización de procesos de mezclado caótico, usando herramientas recientemente desarrolladas para el control de flujos. Se propone hacer interactuar experiencias, simulaciones, modelos y aprendizaje de máquina para encontrar y entender un sistema de control a lazo cerrado que optimiza el mezclado caótico en flujos de bajo número de Reynolds en microcanales.

El sistema a estudiar consiste en dos fluidos de conductividad eléctrica y propiedades ópticas diferentes que se juntan en un micro-canal. El micro-canal está equipado de sensores y actuadores (en principio actuadores EHD, o actuadores mecánicos), además de

una geometría apropiada. Se diseñará el controlador usando dos caminos alternativos. Por un lado, se derivará un modelo reducido a partir del modelo general e identificación del sistema. De este modelo se obtendrá el controlador que permitirá obtener exponentes de Lyapunov finitos máximos. Por otra parte se usará un algoritmo recientemente desarrollado, para el control mediante programación genética [15]. Este método permite obtener las leyes de control de manera pragmática, usando un algoritmo empírico de exploración y explotación basado en la teoría de la evolución.

Objetivos

Buscaremos desarrollar un diseño con una geometría que permita la introducción de caos en el flujo. Para ello planteamos la existencia de puntos de separación de corrientes dentro del fluido, que generan autovalores del Jacobiano del sistema dinámico altamente inestables. Proponemos que elementos del fluido puedan pasar varias veces por tales puntos mediante bucles de recirculación, en los cuales el flujo será controlado con actuadores.

Proponemos realizar los siguientes pasos clave:

I. Obj 1: Desarrollo del sistema experimental

- Obj. 1.1: Diseño y construcción del micro-canal mezclador. El canal integrará la posibilidad de introducir dos fluidos diferentes, uno de cada lado (ver Fig.1) y medir cómo se mezclaron. Se buscará un diseño flexible, adaptable a los sensores y actuadores que se planean usar y variaciones de la geometría que permite inducir caos en el flujo. El diseño del canal puede evolucionar de manera de añadir más sensores/actuadores. Las dimensiones y medidas tendrán relación con el problema estudiado y la bibliografía relacionada.
- Obj. 1.2: Diseño y construcción de los actuadores. Los actuadores serán en principio electrodos que permiten introducir un campo eléctrico, para imponer una fuerza EHD sobre el fluido (electroósmosis). La combinación de varios actuadores debería permitir introducir un número de grados de libertad suficiente como para introducir caos en el flujo. El desafío mayor en este caso es de evitar reacciones de óxido reducción en los electrodos y la formación de burbujas [16], y a su vez tener una fuerza aplicada comparable al gradiente de presión usado para imponer el flujo principal.
- Obj. 1.3: Diseño y construcción de los sensores. Los sensores están compuestos por electrodos que introducen una débil diferencia de potencial alterna. Midiendo la corriente, es posible determinar la resistencia entre ambos y así la conductividad del fluido. Comparando las medidas a la entrada y la salida del canal, se podrá evaluar cómo se mezcló el flujo.
- Obj. 1.4: Integración con un controlador en tiempo real y enlaces con algoritmos externos. El controlador es el que envía las instrucciones a los actuadores, dependiendo del tiempo, de las instrucciones anteriores y de los sensores. En esta etapa se comprobará la capacidad del diseño para realizar acciones especificadas, que dependen de los sensores y de la historia de la experiencia.

II. Obj. 2: Base de datos experimental

Se necesita estudiar flujos no actuados y actuados que permitan alimentar una base de datos en la cual se basen los algoritmos de identificación de sistema. En la base de datos se incluirán puntos de referencia para poder realizar comparaciones.

III. Obj. 3: Diseño del control

- Obj. 3.1: A partir de un modelo físico

Teniendo un modelo reducido, se pueden aplicar herramientas clásicas de diseño de control, que incluyen el control con predicción de modelo (MPC), controladores por gradiente lineal-cuadrático (LQG), controladores proporcional-integrador-derivador (PID) y sus variaciones.

• **Obj. 3.2:** A partir de un modelo de caja negra

Existen maneras de obtener leyes de control sin la necesidad de un modelo. Recientemente se desarrolló el control con programación genética (GPC) [15, 17, 18], el cual permite determinar una ley de control no lineal de manera no supervisada, explotando un algoritmo basado en la teoría de la evolución.

IV. Obj. 4: Control a lazo cerrado

Este objetivo corresponde a la prueba de cada ley de control diseñada, en el sistema experimental. Compararemos los escurrimientos controlados con la base de datos obtenida en el Obj. 2 y la bibliografía.

Antecedentes

El proyecto busca la conjunción entre la microfluídica experimental, numérica y el control de fluidos. La optimización de la mezcla es un tema importante, y muchos estudios demuestran la importancia de la advección caótica para realizar una mezcla óptima. Sin embargo, pocos estudios previos se han llevado a cabo para aplicar control de fluidos, en lazo cerrado y tiempo real, a dispositivos para microfluídica y mezcla a bajo número de Reynolds. En esta sección detallamos los puntos de bibliografía relevantes acerca de este proyecto. Estos puntos son:

1. Mezclado en dispositivos microfluídicos
2. Identificación de sistema, modelos reducidos y algoritmos de control

I. CONTRIBUCIONES EXTERIORES

Mezclado en dispositivos microfluídicos: El mezclado en dispositivos microfluídicos resulta crucial para un amplio número de aplicaciones incluyendo aquellos dispositivos que apuntan al control de reacciones químicas o biológicas. Así, el mezclado rápido de dos soluciones permite a los químicos el estudio de la dinámica de las reacciones que se desarrollan, que de otro modo estarían contaminadas por la dinámica de difusión de las moléculas mismas. Los flujos laminares que se desarrollan naturalmente a bajo número de Reynolds hacen que el mezclado se produzca sólo por difusión, con tiempos de mezclado inaceptablemente largos. Esto ha llevado al desarrollo de estrategias de intensificación del mezclado ya sea de modo pasivo o activo. El uso de flujos secundarios en canales curvados llevó al desarrollo de un micromezclador tridimensional de tipo serpentina [19, 20]. Otra alternativa usada consistió en aumentar el área de interfase como en los dispositivos que involucran flow focusing [21, 22, 23]. Otra herramienta utilizada ha sido el uso de flujos pulsados, en particular la inyección alternada de muestras [24, 25]. El mezclado más eficiente se logra, sin embargo, mediante la introducción de caos en el sistema [10, 11, 12, 13, 14]. El mezclado ocurre, en última instancia, por difusión molecular. La introducción de caos permite mediante el estiramiento y plegado de las líneas materiales, una disminución de la distancia en la que la difusión se debe producir. Un ejemplo de diseño pasivo para mezclado caótico es el clásico diseño en espiga de Stroock et al. [9], y los diseños que siguieron en base a este [26, 27]. Otra alternativa de mezclador caótico pasivo consiste en el uso de separación-recombinación de corrientes (SAR por su sigla en inglés)[28, 29, 30]. Los métodos pasivos descritos requieren técnicas de microfabricación complejas, y en general están optimizados para un flujo determinado. Los métodos activos son más flexibles a variaciones de las condiciones experimentales, y en general son constructivamente más simples, aunque requieren de un actuador controlado externamente [31]. Dentro de este

grupo se encuentran los dispositivos basados en forzado electrocinético (no solo sirve para el bombeo de fluido -i.e. electroósmosis- sino también para el control local del flujo). Así, se pueden encontrar trabajos basados en la variación espacial del potencial zeta en las paredes del canal [32, 33], o mediante la introducción de electrodos superficiales en contacto con el líquido [34], o aislados [35]. También se ha buscado mejorar el mezclado mediante arreglos más complejos de electrodos [36, 37, 38]. Por otro lado, se puede hacer uso de inestabilidades electrocinéticas para mejorar el mezclado [39, 40, 41]. Por último, se puede utilizar flujos multifase para realizar mezclado en micro gotas (microfluídica digital), pero esto está fuera del tema de este proyecto, ya que nos interesamos en el mezclado continuo de dos corrientes. Se pueden encontrar reviews [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 42, 43, 44] completas sobre micromezcladores e inclusive algunos libros dedicados ya sea completamente [2], o con algún capítulo dedicado al tema [45, 46, 47, 48].

Control de flujos a lazo cerrado: El control de flujo es un dominio de la mecánica de fluidos dedicado a introducir modificaciones a un flujo para cambiar su comportamiento de acuerdo a un objetivo. Se pueden nombrar tres formas de llegar al control de flujo [49]: (1) control pasivo, (2) control activo, (3) control retroactivo o a lazo cerrado. El control pasivo consiste en ajustes de parámetros (como la geometría), es sencillo de desarrollar pero tiene el inconveniente de impactar el flujo cualquiera sean las condiciones. Además, está limitado por la energía que existe en el sistema. El control activo permite añadir energía al sistema, y permite añadir una dependencia en el tiempo. Usualmente tales controles aprovechan la sensibilidad de los escurrimientos a frecuencias especificadas. Finalmente el control en lazo cerrado permite tener una actuación que depende del estado de flujo. Este tipo de control permite servirse de la evaluación de la trayectoria del sistema dinámico para lograr estabilización o desestabilización, incluir robustez, o cambiar parámetros de acuerdo al objetivo. De hecho, el control de flujo a lazo cerrado [50, 51, 52, 53] permite obtener mejoras en disminución de fuerza de arrastre [54], aumento de fuerza de sustentación [55], aumento de mezcla [17], reducción de ruido [56]. La metodología para diseñar un controlador a lazo cerrado depende fuertemente del tipo de sistema que se está estudiando y del conocimiento de su dinámica. El diseño de control con modelo físico es la parte la más estudiada del control de sistemas y se apoya en la determinación de un sistema dinámico a partir de las ecuaciones de Navies-Stokes o de datos sobre un sistema (experimental o numérico), usando una familia de métodos específicos. Estos son proyecciones de Galerkin de descomposiciones en modos ortogonales [58, 59, 60], descomposiciones en modos dinámicos [61, 62], identificación de sistemas [63], clustering y reconstrucción de modelos de Markov [64]. Cada uno de estos métodos tiene ventajas e inconvenientes, mayormente relacionados al número de no-linealidades que pueden modelizar y aceptar. La mayor ventaja de usar esta aproximación es que se puede diseñar el controlador a partir del modelo. Si el modelo es lineal o débilmente no-lineal se abre una biblioteca importante de controladores posibles, aprovechando décadas de conocimiento sobre sistemas dinámicos lineales. Por otro lado, si el sistema tiene una complejidad alta (número de grados de libertad alto o no-linealidades fuertes), la obtención de un modelo es más compleja, y éste puede ser inutilizable para diseñar un controlador. En este caso queda la posibilidad de diseñar un controlador sin modelo. En esta categoría entran algoritmos adaptativos que aprovechan una dependencia monótonica de algunos parámetros con el objetivo, o un extremo en la curva de la función de objetivos. Estos tipos de controladores lamentablemente no pueden alcanzar performances mayores al forzado óptimo a lazo abierto. Además la actualización de los parámetros del sistema se realiza con un tiempo característico que usualmente es más alto que los tiempos característicos del flujo. Entre los candidatos para lograr resultados satisfactorios de sistemas de control a lazo cerrado en tiempo real aparecen sin duda aquellos que se basan en el uso de algoritmos evolutivos [15] (llamados control por programación genética), que usan evaluaciones de conjuntos de leyes de control sobre el sistema experimental para evolucionar una ley que cumple con el objetivo.

Basados en este enfoque se encuentran aplicaciones en un número amplio de dominios: transporte automotor, aeronáutica, transporte ferroviario, generación de energía (eólica),

combustión, reactores químicos, para citar unos ejemplos. En microfluídica se encuentran estudios que aprovechan la capacidad de controladores a lazo cerrado para mejorar la robustez de los procesos. Se establecen las performances alrededor de una referencia con controladores de tipo PID para controlar el tamaño de gotas [65], el pH del fluido [66] o la concentración de coloides [67]. Se utilizan algoritmos de decisión para disparar actuadores que eviten una degradación del funcionamiento [68, 69]. Si bien existen métodos para controlar sistemas caóticos [70, 71], pocos estudios demuestran la capacidad para

II. CONTRIBUCIONES DEL GRUPO

Contribuciones del grupo en el campo de microfluídica, EHD y electrización de flujos:

Juan Martín Cabaleiro estudió la interacción sólido-líquido en canales y micro-canales, enfocándose en el proceso de formación de la doble capa eléctrica [74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 81, 82, 83]. En los últimos años se ha interesado en el control de flujos en microcanales mediante actuadores EHD. Ha realizado estudios relativos a la respuesta dinámica de microcanales ante la aplicación de un campo eléctrico externo mediante modelos numéricos [84] y estudios experimentales [85]. Resultados preliminares de estos trabajos fueron presentados en conferencias (RNF 2013 y Fluidos 2012) y finalmente un trabajo completo en JMFNF [86]. A su vez se interesó en el fenómeno de flow focusing para la generación de magnetoliposomas en microcanales [87] y en el diseño de microbombas [88].

Contribuciones del grupo en el campo de modelos reducidos y control: El grupo participó en el desarrollo de modelos reducidos, primero a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes. La utilización de asimilación de datos [89, 90, 91] permite llegar a modelos reducidos con un cierre del modelo adecuado optimizado con los datos experimentales. También se desarrolló la obtención de modelos acoplando técnicas de tipo POD y DMD [92], las cuales permiten construir un modelo a partir de los modos temporales de la POD, conservando la ventaja de la POD que representa bien el contenido energético de cada modo. Usando un método espectral sobre estos modos, se obtiene un modelo dinámico reducido con una representación mayor de las estructuras secundarias en comparación a un método de DMD clásico. Se investigó también la posibilidad de obtener un modelo reducido a partir solamente de la respuesta de un flujo a actuaciones. Usando algoritmos auto-regresivos de tipo ARX [93], se construyó un sistema dinámico que permite evaluar la influencia de una actuación sobre los sensores en un flujo de estela de un cilindro. Estos métodos fueron conjuntamente utilizados en [94].

El grupo también cuenta con contribuciones en el campo del control a lazo cerrado. A partir de un modelo auto-regresivo, obtenido a partir de líneas de emisión en un escurrimiento de estela de un cilindro, se desarrolló un controlador a predicción de modelo (MPC) para estabilizar la estela [93]. Este trabajo demuestra la posibilidad de obtener un modelo solamente a partir de mediciones integradas sobre el escurrimiento (las líneas de emisión) y lograr un control a lazo cerrado que minimiza el ancho de la estela. Estos resultados son importantes para comprobar las habilidades de métodos lineales para obtener un modelo lineal que permite diseñar un controlador que funciona sobre un escurrimiento no-lineal. Además, comprueba que es suficiente contar con visualizaciones para construir un modelo adecuado para controlar el flujo, sin tener que acceder a medidas de velocidad. Fueron realizados los primeros esfuerzos para obtener un controlador, en tiempo real, experimental y en lazo cerrado en [95], donde se desarrolló un controlador que implementa auto-sincronización con tiempos de retraso para estabilizar un sistema dinámico caótico de Rossler. Este sistema implementa una evaluación del estado del sistema en tiempo real que permite detectar cuándo y con cuáles parámetros empezar el control retro-activo. Luego se desarrolló el primer algoritmo de control a lazo cerrado basado únicamente en medidas experimentales, el control por programación genética (GPC). Este algoritmo aprovecha su lado evolutivo para encontrar funciones de control no-lineales. Los resultados basados en este algoritmo integran control de sistemas dinámicos fuertemente no-lineales y

maximización de exponente de Lyapunov en sistemas caóticos [15] y control a lazo cerrado, en tiempo real, de flujos turbulentos [17, 18].

1. RESULTADOS PRINCIPALES

- Hemos fabricado y probado un diseño de canal con 4 sensores y 3 actuadores (ver Figura 4) que nos permite actuar y sensor según nuestras necesidades de control del sistema.
- Hemos caracterizado, a partir del método PIV, los principales flujos actuantes en nuestro sistema Electro-hydro-dinámico, que servirá para modelar las leyes de control implementadas en una etapa posterior. (Figura 5)
- Hemos realizado el software de control a lazo cerrado en la tarjeta Arduino que permite llegar a tomar de medidas y comandar la actuación con frecuencias por encima de 1kHz.
- Hemos realizado las primeras pruebas de mezclado en lazo abierto con los actuadores EHD a diferentes velocidades del flujo y diferentes frecuencias de actuación (ver [96]).
- Hemos realizado las primeras pruebas de optimización del exponente de Lyapunov sobre un sistema dinámico de bajo orden. El sistema es un sistema de Lorenz con número de Rayleigh $\rho = 20$, $\beta = 8/3$ y $\sigma = 10$. Para estos parámetros el sistema es cíclico y no exhibe caos. Determinando una ley de control con GPC para optimizar el exponente de Lyapunov máximo del sistema, logramos poner el sistema en estados caóticos, con exponente máximo de Lyapunov creciente a medida que se disminuye la penalización sobre la energía inyectada (figura 6).

Hemos codificado un escurrimiento de doble gyre que permite modelizar el mezclado en una sección de un micro-canal. Se usa esta simulación para optimizar los campos de exponente de Lyapunov usando GPC. Por ahora se usa concentración de partículas en algunas partes del campo como sensores, y la ley de control determina la longitud de onda y la amplitud de remolinos introducidos. Si bien la ley de control encontrada por ahora es difícilmente reproducible experimentalmente (derivadas demasiado altas), GPC logra tener una mezcla efectiva y homogénea en un tiempo corto.

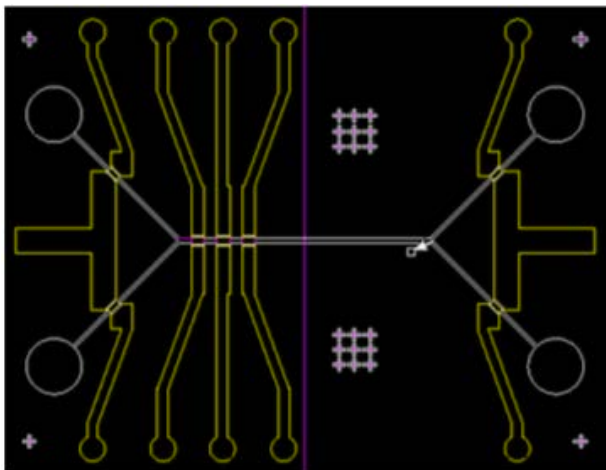


FIGURA 4

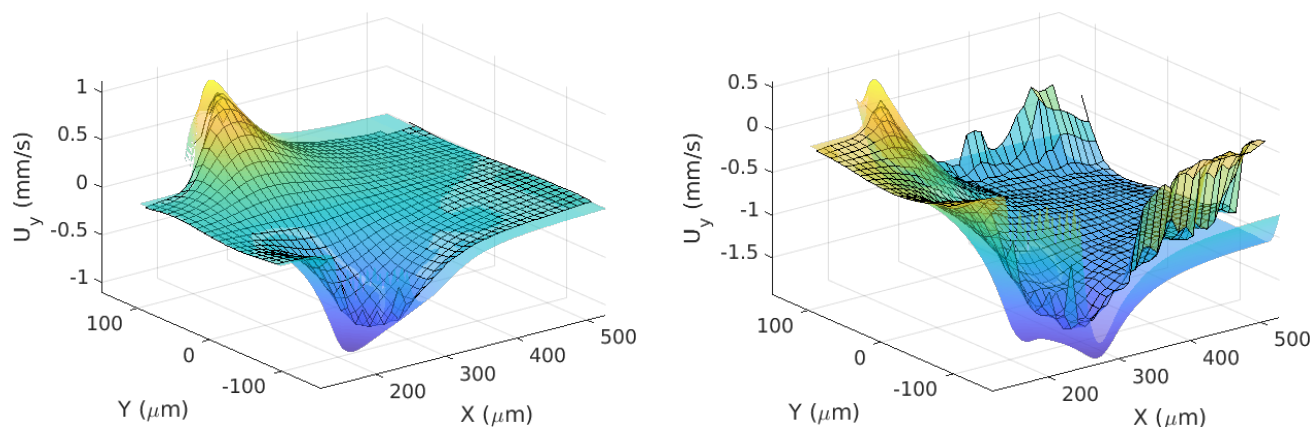


FIGURA 5

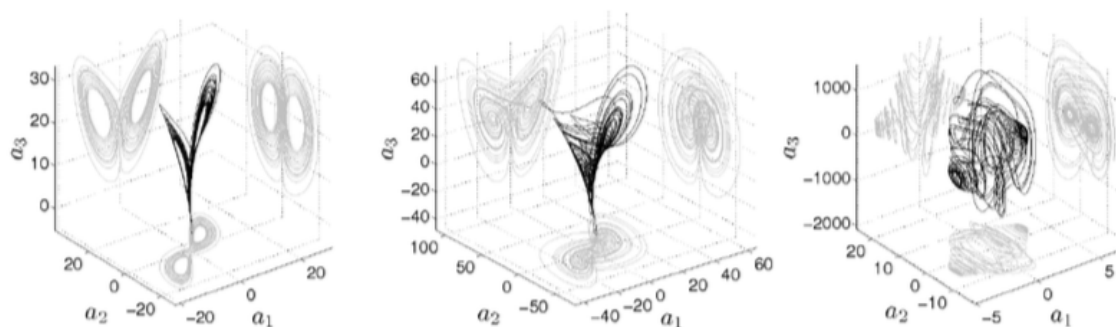


FIGURA 6

Bibliografía

- [1] T. M. Squires and S. R. Quake. Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale. *Rev. Mod. Phys.*, 77:977–1026, Oct 2005.
- [2] N.-T. Nguyen, editor. *Micromixers: Fundamentals, Design and Fabrication*. Micro and Nano Technologies. William Andrew Publishing, Oxford, second edition edition, 2012.
- [3] C. Y. Lee, C.-L. Chang, Y.-N. Wang, and L.-M. Fu. Microfluidic mixing: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 12(5):3263–3287, 2011.
- [4] Y. K. Suh and S. Kang. A review on mixing in microfluidics. *Micromachines*, 1(3):82–111, 2010.
- [5] L. Capretto, W. Cheng, M. Hill, and X. Zhang. Micromixing within microfluidic devices. In Bingcheng Lin, editor, *Microfluidics*, volume 304 of *Topics in Current Chemistry*, pages 27–68. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [6] H.E.H. Meijer, M. K. Singh, T. G. Kang, J. M.J. den Toonder, and P. D. Anderson. Passive and active mixing in microfluidic devices. *Macromol. Symp.*, 279(1):201–209, 2009.
- [7] V. Hessel, H. Löwe, and F. Schönfeld. Micromixers—a review on passive and active mixing principles. *Chemical Engineering Science*, 60(8–9):2479 – 2501, 2005. 5th International Symposium on Mixing in Industrial Processes (ISMIP5).
- [8] J. M. Ottino and S. Wiggins. Introduction: mixing in microfluidics. *Philos. T. Roy. Soc. A*, 362(1818):923–935, 2004.

- [9] A. D. Stroock, S. K. W. Dertinger, A. Ajdari, I. Mezić, H. A. Stone, and G. M. Whitesides. Chaotic mixer for microchannels. *Science*, 295(5555):647–651, 2002.
- [10] J. M. Ottino. *The Kinematics of Mixing, Stretching, Chaos, and Transport*. Cambridge University Press, 1989.
- [11] J. M. Ottino. Mixing, chaotic advection, and turbulence. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 22(1):207–254, 1990.
- [12] S. Wiggins and J. M. Ottino. Foundations of chaotic mixing. *Philos. T. Roy. Soc. A*, 362(1818):937–970, 2004.
- [13] H. Aref. Stirring by chaotic advection. *J. Fluid Mech.*, 143:1–21, 6 1984.
- [14] H. Aref. The development of chaotic advection. *Phys. Fluids*, 14(4):1315–1325, 2002.
- [15] T. Duriez, V. Parezanović, L. Cordier, B. R. Noack, J. Delville, J.-P. Bonnet, M. Segond, and M. Abel. Closed-loop turbulence control using machine learning. *arXiv preprint arXiv:1404.4589*, 2014.
- [16] H. Y. Lee, C. Barber, and A. R. Minerick. Improving electrokinetic microdevice stability by controlling electrolysis bubbles. *Electrophoresis*, 35(12-13):1782–1789, 2014.
- [17] V. Parezanović, J.-C. Larentie, C. Fourment, J. Delville, J.-P. Bonnet, A. Spohn, T. Duriez, L. Cordier, B.R. Noack, M. Abel, M. Segond, T. Shaqarin, and S.L. Brunton. Mixing layer manipulation experiment. *Flow, Turbulence and Combustion*, 94(1):155–173, 2015.
- [18] N. Gautier, J.-L. Aider, T. Duriez, B. R. Noack, M. Segond, and M. Abel. Closed-loop separation control using machine learning. Accepted at *J. Fluid Mech.*, 1:1, 2015.
- [19] R.H. Liu, M.A. Stremler, K.V. Sharp, Michael G. Olsen, J.G. Santiago, R.J. Adrian, H. Aref, and D.J. Beebe. Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 9(2):190–197, June 2000.
- [20] B. M. Rush, K. D. Dorfman, H. Brenner, and S. Kim. Dispersion by pressure-driven flow in serpentine microfluidic channels. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(18):4652–4662, 2002.
- [21] S. A. Pabit and S. J. Hagen. Laminar-flow fluid mixer for fast fluorescence kinetics studies. *Biophys. J.*, 83(5):2872–2878, 11 2002.
- [22] N.-T. Nguyen and X. Huang. Mixing in microchannels based on hydrodynamic focusing and time-interleaved segmentation: modelling and experiment. *Lab. Chip*, 5:1320–1326, 2005.
- [23] J. Cha, J. Kim, S. Ryu, J. Park, Y. Jeong, S. Park, S. Park, H. C. Kim, and K. Chun. A highly efficient 3d micromixer using soft pdms bonding. *J. Micromech. Microeng.*, 16(9):1778, 2006.
- [24] J.M. MacInnes, Z. Chen, and R.W.K. Allen. Investigation of alternating-flow mixing in microchannels. *Chemical Engineering Science*, 60(13):3453 – 3467, 2005.
- [25] J. T. Coleman and D. Sinton. A sequential injection microfluidic mixing strategy. *Microfluidics and Nanofluidics*, 1(4):319–327, 2005.
- [26] M. Camesasca, M. Kaufman, and I. Manas-Zloczower. Staggered passive micromixers with fractal surface patterning. *J. Micromech. Microeng.*, 16(11):2298, 2006.
- [27] J.T. Yang, W.-F. Fang, and K.-Y. Tung. Fluids mixing in devices with connected-groove channels. *Chemical Engineering Science*, 63(7):1871 – 1881, 2008.
- [28] S. Hardt, H. Pennemann, and F. Schönfeld. Theoretical and experimental characterization of a low-reynolds number split-and-recombine mixer. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2(3):237–248, 2006.
- [29] Se. W. Lee, D. S. Kim, S. S. Lee, and T. H. Kwon. A split and recombination micromixer fabricated in a pdms three-dimensional structure. *J. Micromech. Microeng.*, 16(5):1067, 2006.
- [30] Y. Suha, S. Heo, Y. Heo, H. Heo, and S. Kang. Numerical and experimental study on a channel mixer with a periodic array of cross baffles. *J. Mech. Sci. Tech.*, 21(3):549–555, 2007.
- [31] P. Tabeling, M. Chabert, A. Dodge, C. Jullien, and F. Okkels. Chaotic mixing in cross-channel micromixers. *Philos. T. Roy. Soc. A*, 362(1818):987–1000, 2004.
- [32] J.-b. Zhang, G.-w. He, and F. Liu. Electro-osmotic flow and mixing in heterogeneous microchannels. *Phys. Rev. E*, 73:056305, May 2006.

- [33] D. Erickson and D. Li. Influence of surface heterogeneity on electrokinetically driven microfluidic mixing. *Langmuir*, 18(5):1883–1892, 2002.
- [34] Z. Wu and D. Li. Micromixing using induced-charge electrokinetic flow. *Electrochimica Acta*, 53(19):5827 – 5835, 2008.
- [35] C. C. Chang and R.-J. Yang. Chaotic mixing in electro-osmotic flows driven by spatiotemporal surface charge modulation. *Phys. Fluids*, 21(5):–, 2009.
- [36] H.-Y. Wu and C.-H. Liu. A novel electrokinetic micromixer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 118(1):107 – 115, 2005.
- [37] N. Sasaki, T. Kitamori, and H.-B. Kim. Ac electroosmotic micromixer for chemical processing in a microchannel. *Lab. Chip*, 6:550–554, 2006.
- [38] S.-H. Huang, S.-K. Wang, H. Seng Khoo, and F.-G. Tseng. {AC} electroosmotic generated in- plane microvortices for stationary or continuous fluid mixing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 125(1):326 – 336, 2007.
- [39] S. M. Shin, I. S. Kang, and Y.-K. Cho. Mixing enhancement by using electrokinetic instability under time-periodic electric field. *J. Micromech. Microeng.*, 15(3):455, 2005.
- [40] M. H. Oddy, J. G. Santiago, and J. C. Mikkelsen. Electrokinetic instability micromixing. *Anal. Chem.*, 73(24):5822–5832, 2001. PMID: 11791550.
- [41] C.-H. Chen, H. Lin, S. K. Lele, and J. G. Santiago. Convective and absolute electrokinetic instability with conductivity gradients. *J. Fluid Mech.*, 524:263–303, 2 2005.
- [42] M. R. Bringer, C. J. Gerdt, H. Song, J. D Tice, and R. F. Ismagilov. Microfluidic systems for chemical kinetics that rely on chaotic mixing in droplets. *Philos. T. Roy. Soc. A*, 362(1818):1087– 1104, 05 2004.
- [43] C. J. Campbell and B. A. Grzybowski. Microfluidic mixers: from microfabricated to self-assembling devices. *Philos. T. Roy. Soc. A*, 362(1818):1069–1086, 2004.
- [44] M. A. Stremler, F. R. Haselton, and H. Aref. Designing for chaos: applications of chaotic advection at the microscale. *Philos. T. Roy. Soc. A*, 362(1818):1019–1036, 2004.
- [45] G. Karniadakis, A. Beskok, and N. Aluru. *Microflows and Nanoflows, Fundamentals and Simulation*. Springer, 1st edition, 2005.
- [46] B. J. Kirby. *Micro- and Nanoscale Fluid Mechanics, Transport in Microfluidic Devices*. Cambridge University Press, 1st edition, 2010.
- [47] P. Tabeling. *Introduction to Microfluidics*. Oxford University Press, 1st edition, 2005.
- [48] S. Mitra and S. Chakraborty. *Microfluidics and Nanofluidics Handbook-Fabrication, Implementation and applications*. CRC Press, 1st edition, 2012.
- [49] M. Gad-el-Hak, A. Pollard, and J.-P. Bonnet. *Flow Control – Fundamentals and practices*. Springer, 1st edition, 1998.
- [50] L. Cattafesta, D. Williams, C. Rowley, and F. Alvi. Review of active control of flow-induced cavity resonance. *AIAA Paper*, 3567:2003–3567, 2003.
- [51] M. N. Glauser, H. Higuchi, J. Ausseur, J. Pinier, and H. Carlson. Feedback control of separated flows. *AIAA Paper*, 2521:2004–2521, 2004.
- [52] P. Moin and T. Bewley. Feedback control of turbulence. *Appl. Mech. Rev.*, 47(6S):S3–S13, 1994.
- [53] M. Samimy, M. Debiase, E. Caraballo, J. Malone, J. Little, H. Özbay, M. Efe, P. Yan, X. Yuan, J. DeBonis, et al. Exploring strategies for closed-loop cavity flow control. *AIAA Paper*, 576:2004– 576, 2004.
- [54] H. Choi, P. Moin, and J. Kim. Active turbulence control for drag reduction in wall-bounded flows. *J. Fluid Mech.*, 262:75–110, 1994.
- [55] W. Kerstens, J. Pfeiffer, D. Williams, R. King, and T. Colonius. Closed-loop control of lift for longitudinal gust suppression at low Reynolds numbers. *AIAA J.*, 49(8):1721–1728, 2011.
- [56] T. Colonius. An overview of simulation, modeling, and active control of flow/acoustic resonance in open cavities. *AIAA Paper*, 76:A01–16014, 2001.
- [57] Steven L. Brunton and Bernd R. Noack. Private communication, 2015.

- [58] B. R. Noack, K. Afanasiev, M. Morzynski, G. Tadmor, and F. Thiele. A hierarchy of low-dimensional models for the transient and post-transient cylinder wake. *J. Fluid Mech.*, 497:335–363, 2003.
- [59] C. W. Rowley, T. Colonius, and R. M. Murray. Model reduction for compressible flows using pod and galerkin projection. *Physica D*, 189(1):115–129, 2004.
- [60] M. Bergmann and L. Cordier. Optimal control of the cylinder wake in the laminar regime by trust-region methods and pod reduced-order models. *J. Comput. Phys.*, 227(16):7813–7840, 2008.
- [61] C. W. Rowley, I. Mezić, S. Bagheri, P. Schlatter, and D. S. Henningson. Spectral analysis of nonlinear flows. *J. Fluid Mech.*, 641:115–127, 2009.
- [62] P. J. Schmid. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data. *J. Fluid Mech.*, 656:5–28, 2010.
- [63] L. Ljung. *System Identification: Theory for the User*. Prentice Hall, 1999.
- [64] E. Kaiser, B. R. Noack, L. Cordier, A. Spohn, M. Segond, M. Abel, G. Daviller, J. Östh, S. Krajnović, and R. K. Niven. Cluster-based reduced-order modelling of a mixing layer. *J. Fluid Mech.*, 754:365–414, 9 2014.
- [65] E. Miller, M. Rotea, and J. P. Rothstein. Microfluidic device incorporating closed loop feedback control for uniform and tunable production of micro-droplets. *Lab. Chip*, 10(10):1293–1301, 2010.
- [66] J. BlaináChristen et al. Real-time feedback control of ph within microfluidics using integrated sensing and actuation. *Lab. Chip*, 14(6):1191–1197, 2014.
- [67] J. J Juárez, P. P. Mathai, J. A. Liddle, and M. A. Bevan. Multiple electrokinetic actuators for feedback control of colloidal crystal size. *Lab. Chip*, 12(20):4063–4070, 2012.
- [68] M. Khine, C. Ionescu-Zanetti, A. Blatz, L.-P. Wang, and L. P. Lee. Single-cell electroporation arrays with real-time monitoring and feedback control. *Lab. Chip*, 7(4):457–462, 2007.
- [69] S.C. Shih, R. Fobel, P. Kumar, and A.R. Wheeler. A feedback control system for high-fidelity digital microfluidics. *Lab. Chip*, 11(3):535–540, 2011.
- [70] K. Pyragas. Continuous control of chaos by self-controlling feedback. *Phys. Lett. A.*, 170(6):421–428, 1992.
- [71] E. Ott, C. Grebogi, and J. A. Yorke. Controlling chaos. *Phys. Rev. Lett.*, 64(11):1196, 1990.
- [72] I. Zelinka, R. Senkerik, and E. Navratil. Investigation on evolutionary optimization of chaos control. *Chaos, Solitons & Fractals*, 40(1):111–129, 2009.
- [73] L. G. de la Fraga and E. Tlelo-Cuautle. Optimizing the maximum Lyapunov exponent and phase space portraits in multi-scroll chaotic oscillators. *Nonlinear Dynamics*, pages 1–13, 2014.
- [74] P Leblanc, J M Cabaleiro, and T Paillat. Numerical study of electrical double layer development: Analysis of the charge genesis. *Journal of Physics: Conference Series*, 646(1):012049, 2015.
- [75] Olivier Moreau, Juan Mart'in Cabaleiro, Thierry Paillat, Guillermo Artana, and Gerard Touchard. Influence of the wall shearing stress on flow electrification. In *Proc. International Symposium on Non thermal Plasmas Electrical Discharges And Dielectric Material*, La Reunion Island, 2015, pages 1–6, 2015.
- [76] J. M. Cabaleiro, T. Paillat, and G. Touchard. Transient electrical double layer dynamics in a quiescent fluid. *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, 21(1):171–178, 2014.
- [77] M. El-Adawy, T. Paillat, G. Touchard, and J. M. Cabaleiro. Numerical simulation of the electrical double layer development: physicochemical model at the solid and dielectric liquid interface for laminar flow electrification phenomenon. *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, 18(5):1463–1475, 2011.

- [78] M. El-Adawy, J. M. Cabaleiro, T. Paillat, O. Moreau, and G. Touchard. Experimental determination of space charge density associated with flow electrification phenomenon: Application to power transformers. *J. Electrostat.*, 67(2):354–358, 2009.
- [79] T. Paillat, J. M. Cabaleiro, H. Romat, and G. Touchard. Flow electrification process: the physicochemical corroding model revisited. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 16(2):359–363, 2009.
- [80] J. M. Cabaleiro, T. Paillat, O. Moreau, and G. Touchard. Flow electrification of dielectric liquids in insulating channels: Limits to the application of the classical wall current expression. *J. Electrostat.*, 66(1):79–83, 2008.
- [81] M. Cabaleiro, G. DiPrimio, and G. Artana. Filamentary actuation on the surface of bodies contoured by high-speed flows. *J. Electrostat.*, 64(7):450–455, 2006.
- [82] J. M. Cabaleiro, T. Paillat, O. Moreau, G. Touchard, et al. Parametric study by electrical analogy: application to flow electrification in power transformer. *Proc de ESA/IEEE-IAS/IEJ/SFE Joint Conference on Electrostatic 2006, Berkeley, USA, 6-9 Juin*, pages 458–469, 2006.
- [83] T. Paillat, O. Moreau, J. M. Cabaleiro, F. Perisse, and G. Touchard. Electrification par écoulement: Modélisation électrique. *J. Electrostat.*, 64(7):485–491, 2006.
- [84] J. M. Cabaleiro. Microfluídica: respuesta dinámica de un sistema capilar-recipientes, ante la aplicación de una diferencia de potencial tipo escalón. *Revista Atenea*, pages 8–15, 2009.
- [85] S. H. Sánchez. Contribución al estudio de flujos electroosmóticos en micro-canales y la aparición de gradientes de presión adversos, 2013. Tesis de grado.
- [86] Arturo Bianchetti, Santiago Hernández Sánchez, and Juan Martín Cabaleiro. Electroosmotic flow profile distortion due to Laplace pressures at the end reservoirs. *Microfluidics and Nanofluidics*, 20(1):1–12, 2016.
- [87] A. J. Conde, M. Batalla, B. Cerda, O. Mykhaylyk, C. Plank, O. Podhajcer, J. M. Cabaleiro, R. E. Madrid, and L. Policastro. Continuous flow generation of magnetoliposomes in a low-cost portable microfluidic platform. *Lab. Chip*, 14:4506–4512, 2014.
- [88] A. J. Conde, A. Bianchetti, F. E. Veiras, A. Federico, J. M. Cabaleiro, M. Dufva, R. E. Madrid, and L. Fraigi. A polymer chip-integrable piezoelectric micropump with low backpressure dependence. *RSC Adv.*, 5:49996–50000, 2015.
- [89] J. D’adamo, N. Papadakis, E. Memin, and G. Artana. Variational assimilation of pod low-order dynamical systems. *Journal of Turbulence*, 1(8), 2007.
- [90] G. Artana, A. Cammilleri, J. Carlier, and E. Memin. Strong and weak constraint variational assimilations for reduced order fluid flow modeling. *J. Comput. Phys.*, 231(8):3264–3288, 2012.
- [91] A. Gronskis, C. Robinson, D. Heitz, E. Memin, et al. A 4dvar piv-data assimilation for flow spatio-temporal reconstruction. In *International Symposium on Particle Image Velocimetry*, 2013.
- [92] A. Cammilleri, F. Guéniat, J. Carlier, L. Pastur, E. Mémin, F. Lusseyran, and G. Artana. Pod-spectral decomposition for fluid flow analysis and model reduction. *Theor. Comp. Fluid Dyn.*, 27(6):787–815, 2013.
- [93] P. Roca, A. Cammilleri, T. Duriez, L. Mathelin, and G. Artana. Streakline-based closed-loop control of a bluff body flow. *Phys. Fluids*, 26(4):047102, 2014.
- [94] A. Knees. Control de flujos en la estela de un cilindro, 2015. Tesis de grado.
- [95] T. Duriez, F. Lusseyran, and L. Pastur. Real-time implementation of delay control on chaotic systems. In *GDR 2502, LIMSI, Orsay, France, November 15-16th*, 2012.
- [96] J.M. Cabaleiro and T. Duriez. Vídeos en vimeo, 2015. <https://vimeo.com/124346908>, <https://vimeo.com/124346907>.

19

Modelado de los procesos de secado y atemperado del arroz IRGA 424

Mercedes Bertotto¹, Marcela Goldschmit¹ y Analía Gastón²

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

² Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIyA), Universidad Nacional de Rosario

Introducción

El arroz es posiblemente el grano que se cultiva desde hace más tiempo y más extensamente, pues ocupa aproximadamente el 9% de la tierra total cultivable y es el segundo cereal en importancia para la nutrición humana, después del trigo. Actualmente es la base de la alimentación de dos tercios de la población mundial. Este cereal ocupa el segundo lugar en la producción a nivel global después del maíz.

Actualmente, se cultiva en 113 países con un nivel de producción según lo estimado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) para la campaña 2016/2017, de 481.5 millones de toneladas.

En la Argentina, el 75% del área sembrada con arroz se localiza en las provincias de Corrientes (41%) y Entre Ríos (34%). También está presente en Santa Fe (19%), Chaco (3%) y Formosa (3%). El promedio de consumo de arroz es de 7 kg por habitante por año, tomando en cuenta los últimos 6 años. En dicho período, el consumo aparente per cápita pasó de 6.9 a 7.6 kg por habitante por año. Comparado con el promedio mundial, nuestro país consume 7 veces menos arroz que en el mundo (54.6 kg por habitante por año). Sin embargo, Argentina participa del 1.4% de las exportaciones mundiales de arroz, siendo un *commodity* fuertemente dinamizador de las economías regionales.

El arroz proveniente del campo es el entero, conocido mundialmente como "paddy" o arroz cáscara; contiene cáscara externa fibrosa y no comestible llamada cascarilla (glumas y glumillas). Cuando se le quita la cáscara pero se conservan el pericarpio (afrecho) y el germen, es el arroz integral o arroz cargo, de color marrón, que después de pulido se transforma en arroz blanco.

El 65% de las exportaciones del sector arrocero se concentran en el arroz semiblanqueado, cerca del 17% en arroz partido, un 9% en arroz descascarillado y el resto en arroz con cáscara y arroz para la siembra.

La planta de arroz puede considerarse madura y lista para la cosecha cuando sus granos tienen un grado de humedad menor que el 28%. Se pudo establecer sin embargo, que si el arroz se cosecha con un contenido de humedad comprendido entre el 26% y 16%, su calidad molinera puede ser superior (Aguerre, 1984).

Asimismo, debe tenerse en cuenta que si el contenido de humedad es menor del 20%, pueden producirse ciertas pérdidas durante la siega, pues el choque de las cuchillas sacude

a las plantas y puede provocar el desgrane. Se concluye que las mejores condiciones para la cosecha corresponden a un grano cuyo contenido de humedad está comprendido entre el 20% y el 26%.

Una vez cosechado el arroz se procede a la trilla; esta es una operación que puede estar combinada con el corte y que permite separar los granos del resto de la planta.

El grano debe almacenarse después de reducir su contenido de humedad al 13%, para evitar el desarrollo microbiano. Es por esto, que luego de la cosecha se procede al secado. El arroz, compuesto por almidón en un 90%, puede ser considerado como un biomaterial hidroscópico. Su temperatura de transición vítrea (T_g) influye en sus propiedades físicas y térmicas.

Durante el secado, los granos de arroz pueden transitar entre estados vítreos y gomosos; en consecuencia, surgen gradientes de MC que influyen en las tensiones internas dentro del grano. Esto genera zonas desiguales dentro del grano es decir, algunas partes pasan del estado gomoso al estado vítreo, mientras que otras partes permanecen en el grano gomoso.

Por lo tanto, dependiendo de la temperatura del aire de secado y la humedad relativa (HR), los granos o regiones dentro del grano, serán vítreos o gomosos, según sus respectivas temperaturas de transición vítrea. Los gradientes de humedad desarrollados de este modo pueden causar fisuras cuando la tensión excede la resistencia a la tracción del grano de arroz. Experimentos de laboratorio y de planta-piloto han indicado que los cambios de estado vítreo-gomoso pueden ser utilizados para explicar la formación de fisuras.

Cuanto mayores son los gradientes generados durante el secado, mayores son los porcentajes de fisuras presentes durante el pulido y descascarillado del arroz. Esto plantea un gran problema para la industria, porque la mayoría de los consumidores prefieren el arroz en forma de granos pulidos enteros.

El rendimiento en grano entero, se toma como un indicador del efecto del proceso de secado en la calidad del arroz.

En el secado de arroz comercial, el arroz se almacena en contenedores entre las etapas de secado durante un período de tiempo; esto se conoce como atemperado. El secado intermitente es un proceso en el que las etapas de secado y atemperado se realizan secuencialmente. La duración del secado y el atemperado tienen una influencia significativa en los gradientes de humedad formados en los granos, y por lo tanto en la formación de fisuras. El atemperado permite la difusión de la humedad desde el interior hacia la superficie del arroz, disminuyendo los gradientes de humedad y reduciendo la formación de fisuras.

Cabe mencionar, que la variedad del arroz tiene un fuerte efecto en la tasa de secado, que, junto con los factores genéticos, influye en su rendimiento. Es decir, diferentes variedades producen respuestas variadas a los mismos procesos de secado. IRGA 424 es una variedad de arroz de grano largo, siendo actualmente uno de los cultivares más cultivados en Argentina. No se han encontrado datos que documenten características fisicoquímicas específicas u otras propiedades relevantes para el proceso de secado relacionados con este cultivar en la literatura.

Con el objetivo de aplicar la hipótesis de T_g para explicar la formación de fisuras, es necesario saber, para una condición de proceso determinada, cuáles regiones dentro del grano sufrieron un cambio de estado y cuáles no.

Objetivos específicos

- 1) Determinación de la temperatura de transición vítrea (diagrama de estado o diagrama de transición vítrea de variedades de arroz argentinas (IRGA 424, desarrollada por INTA). Se puso a punto una experiencia usando un analizador dinámico mecánico (DMA) del laboratorio de polímeros de la Facultad de Ingeniería.
- 2) Cálculo del efecto de las condiciones de secado en la calidad del arroz incorporando principios de transición vítrea mediante la metodología de modelos de superficie de respuesta. Se puso a punto de un experimento de secado y atemperado de granos de arroz,

usando el equipamiento del Departamento de Industrias de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

3) Obtención de las condiciones de trabajo para lograr el máximo rendimiento de molienda. Se puso a punto un experimento para determinar el rendimiento de grano entero con un molino arrocero de laboratorio del Departamento de Industrias de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

4) Cálculo de los parámetros del secado a partir del ajuste matemático de diversas ecuaciones de secado de la literatura.

5) Obtención de una ecuación de capa delgada que predecirá satisfactoriamente el secado del arroz.

6) Evaluación de 5 modelos matemáticos en base a su capacidad para predecir T_g en función al contenido de humedad de muestras de arroz.

7) Desarrollo de una nueva expresión matemática mejoradora que permita predecir satisfactoriamente la T_g de la variedad estudiada en función de su contenido de humedad.

Análisis de los procesos de secado y atemperado del arroz

Se implementó el Diseño Experimental de Box-Behnken para evaluar el efecto de las condiciones de secado sobre las respuestas. Este tipo de diseño de superficie de respuesta, no tiene una forma factorial o factorial fraccionado incrustado. En cambio, el diseño Box-Behnken tiene combinaciones de tratamientos que están en los puntos medios de los bordes del espacio experimental y que requieren al menos tres factores continuos. Como suelen tener menos puntos de diseño, son menos costosos de realizar que los diseños centrales compuestos con el mismo número de factores.

Las respuestas que se buscó optimizar fueron el Rendimiento Total de la molienda o Milled Rice Yield (RT o MRY), el Rendimiento en Grano Entero o Head Rice Yield (RGE o HRY) y el tiempo total de proceso (TP). Para este trabajo, optimizar significó minimizar este último y maximizar ambos rendimientos. Los factores (codificados) que afectaron las respuestas estudiadas fueron la temperatura de secado (X_1), el tiempo de atemperado (X_2) y la humedad inicial de atemperado (X_3).

Se seleccionó un modelo polinomial de segundo grado asociado al diseño experimental según la siguiente ecuación:

$$R_i = a_0 + a_1X_1 + a_{11}X_1^2 + a_2X_2 + a_{22}X_2^2 + a_{12}X_1X_2 + a_3X_3 + a_{33}X_3^2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 \quad (1)$$

Los coeficientes a_0 , a_1 y a_{11} , representaron los efectos constantes, lineales y cuadráticos, respectivamente, en tanto que los coeficientes a_{12} , a_{13} y a_{23} representaron el efecto de interacción entre cada par de factores codificados X_1 , X_2 y X_3 . El diseño elegido permitió una estimación eficiente de los coeficientes de primer y segundo orden.

Los puntos de diseño se situaron en combinaciones de los niveles altos y bajos de los factores y sus puntos medios. Como el diseño elegido no posee puntos axiales, todas las condiciones a evaluar se encontraron dentro de la zona de operación segura:

Factores experimentales y codificados (entre paréntesis):

X_1 : Temperatura de secado 40 °C (-1), 50 °C (0) y 60 °C (+1).

X_2 : Tiempo de Atemporado 40 min (-1), 80 min (0) y 120 min (+1).

X_3 : Humedad inicial de Atemporado (base seca) 15 % (-1), 17 % (0) y 19% (+1).

Respuestas:

RT (o MRY): Rendimiento Total (Milled Rice Yield) (%).

RGE (o HRY): Rendimiento Grano Entero (o Head Rice Yield) (%).

TP: Tiempo total del proceso (min).

Se analizó entonces el efecto de las condiciones de secado sobre los rendimientos de la molienda y el tiempo total del proceso mediante la metodología de las superficies de respuesta. Las respuestas estudiadas se ajustaron mediante la Ecuación (1) determinándose los coeficientes por regresión no lineal. La Tabla 1 muestra los coeficientes de dicha ecuación, obtenidos mediante el programa STATGRAPHICS® (StatisticalgraphicsCorporation, USA), para las diferentes respuestas estudiadas. Cabe aclarar que algunos coeficientes no significativos fueron incluidos en la Tabla dado que contribuyeron a mejorar el ajuste del modelo propuesto.

La Tabla 1 muestra la significancia estadística de cada efecto que fue obtenida comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. El estadístico R^2 indicó que el modelo, así ajustado, explicó 91,5% de la variabilidad en RT, 98,2% en RGE y 98,3 % en TP.

Análisis de las curvas DMA

Se identificó claramente, a partir de los resultados DMA que el aumento de temperatura estuvo acompañado por una pérdida significativa del módulo de almacenamiento (E'). Sin embargo, no se observaron variaciones drásticas en este módulo en ninguna de las curvas de harina de arroz obtenidas, sino que el mismo disminuyó de manera continua desde el comienzo del calentamiento hasta el final del experimento. Esto significa que la relajación de la fase amorfa de las muestras fue limitada.

Tabla 1. Efecto de las condiciones de secado sobre las respuestas estudiadas: coeficientes de la Ec. (1), nivel de significación y coeficiente de determinación de la regresión.

Coficiente	RT	RGE	Tiempo total de secado (min)
Constante a_0	72,96	40,07	95,95
Lineal a_1	0,97 ***	-4,17 ***	-16,65 ***
a_2	-0,045 NS	-0,17 NS	37,88 ***
a_3	0,73*	-2,90 ***	3,85 NS
Cuadrático $a_{1.1}$	-2,67 ***	4,68 ***	-----
$a_{2.2}$	-0,47 NS	-----	9,12 ***
$a_{3.3}$	-----	-2,62 ***	13,27 ***
Interacción $a_{1.2}$	0,57 NS	1,68 ***	5,0 NS
$a_{1.3}$	-2,32 ***	-2,93 ***	-----
$a_{2.3}$	-0,49 NS	-4,72 ***	4,75 NS
Correlación R^2	0,9153	0,9821	0,9829

***, **, *: coeficientes significativos para intervalo de confianza de 99%, 95% y 90% respectivamente; NS: no significativo; ----- coeficiente excluido.

El comportamiento de la $\tan(\delta)$ de la harina de arroz en función de la temperatura fue similar al del módulo de pérdida de la harina de arroz en función de la temperatura. Ambos difirieron del módulo de almacenamiento, ya que no disminuyeron constantemente en todo el rango, pero en cambio, sus valores primero crecieron y luego disminuyeron, formando curvas con un valor máximo. E''/E' ($\tan(\delta)$), mostró una marcada transición en las muestras analizadas.

Se esperaba una ligera pérdida de humedad debido al aumento de temperatura durante las pruebas. El sobre de acero inoxidable en el que se colocaron las muestras ayudó a limitarlo, de manera que la pérdida de humedad durante los ensayos fue despreciable.

La Figura 1 presenta la curva del análisis dinámico mecánico de una harina de arroz IRGA 424 con un 10.17% de MC en base húmeda. En este caso, la curva $\tan \delta$ mostró un pico en aproximadamente el 90° C. La transición vítrea no apareció bruscamente sino como un cambio gradual en la pendiente del gráfico. Esto se debe al hecho de que el fenómeno consiste en 3 tipos diferentes de movimientos: deformación, difusión molecular y rotación de los grupos de átomos de la cadena polimérica alrededor de los enlaces covalentes. Estos mecanismos de movilidad molecular se utilizan como base explicativa de los fenómenos que ocurren antes, durante y después de la transición vítrea (Hoyos 2010). Vale la pena mencionar que el arroz es un material heterogéneo. Además, hay varias temperaturas de transición correspondientes a diferentes microrregiones.

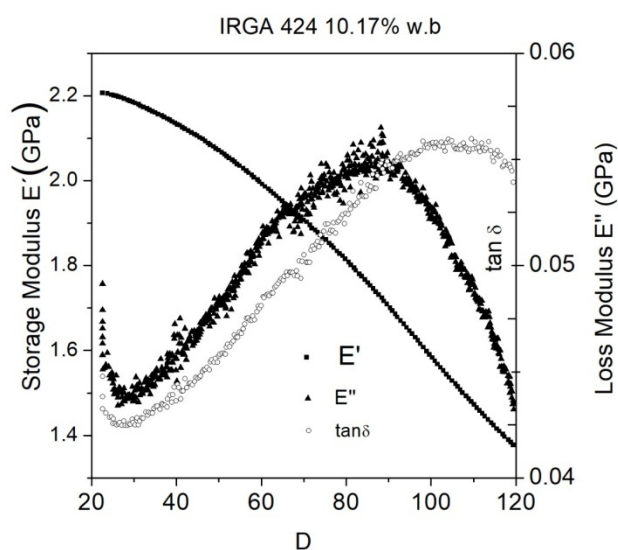


Figura 1: Curva DMA de harina de arroz IRGA 424 con 10.17% de humedad, en base húmeda (wetbasis).

Resumen

EL objetivo de este trabajo fue el de investigar los efectos de la temperatura de secado (40,50,y 60°C), del tiempo de atemperado (40, 80, and 120min), y del contenido de humedad al inicio del atemperado (15, 17, and 19% base seca) en los rendimientos y en el tiempo de proceso del arroz IRGA 424.

Los factores más significativos fueron la temperatura de secado y su interacción con la humedad al inicio del atemperado. Las condiciones óptimas predichas para alcanzar el máximo rendimiento en grano entero (74.1%) fueron 46.6°C, 49min de tiempo de atemperado, y contenido inicial de humedad de 19%.

El máximo rendimiento total (52.9%), se alcanza a 40°C, 40 min de atemperado, y 19% de humedad inicial. Bajo estas condiciones, la humedad de almacenamiento se alcanza en 84 minutos. Los rendimientos de la molienda pueden ser maximizados a través de la optimización del proceso de secado. Esto permite utilizar un mayor porcentaje del cultivo para el consumo humano, aumentando el valor de la producción, y disminuyendo la proporción destinada al consumo animal, que presenta un menor valor en el mercado.

Referencias bibliográficas

- 1 Aguerre RJ, Rice drying: study of kinetics and variables affecting grain quality in dehydration. PhD thesis. Buenos Aires, Argentina: Department of Industries, Universidad de Buenos Aires (1984).
- 2 Slade L and Levine H, Beyond water activity: recent advances based on an alternative approach to the assessment of food quality and safety. *CritRevFoodSciNutr*30:115–360 (1991).
- 3 Yang W and Jia C, Glass transition mapping inside a rice kernel. *Trans ASAE* 47:2009–2015 (2003).
- 4 Fan J, Siebenmorgen TJ and Yang W, A study of head rice yield reduction of long and medium grain rice varieties in relation to various harvest and drying conditions. *Trans ASAE* 43:1709–1714 (2000).
- 5 Iguaz A, Rodriguez M and Virseda P, Influence of handling and processing of rough rice on fissures and head rice yields. *J FoodEng*77:803–809 (2006).
- 6 Li YB, Cao CW, Yu QL and Zhong QX, Study on rough rice fissuring during intermittent drying. *DryingTechnol*17:1779–1793 (1999).
- 7 Schluterman DA and Siebenmorgen TJ, Relating rough rice moisture content reduction and tempering duration to head rice yield reduction. *Trans ASAE* 50:137–142 (2005).
- 8 Siebenmorgen TJ, Yang W and Sun Z, Glass transition temperature of rice kernels determined by dynamic mechanical thermal analysis. *Trans ASAE* 47:835–839 (2004).
- 9 Cnossen AG and Siebenmorgen TJ. Effect of tempering temperature and duration on rice milling quality. in *2001 ASAE Annual Meeting*. ASABE paper no. 016117, (2001) <https://doi.org/10.13031/2013.4349>.
- 10 <https://agronews.com.ar/arroz-en-entre-rios-se-redujo-un-10-el-area-cultivada>.
- 11 http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/semillas/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=24Fuente: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=746319>
- 12 <https://www.naturalcastello.com/arroz-propiedades-y-valor-nutricional>
- 13 Chirife, J., and Buera, M. P. 1994. Water activity, glass transition and microbial stability in concentrated and semimoist food systems. *J.Food Sci.* 59:921-927.
- 14 William L Kerr, Miang H Lim, David S Reid, Hong Chen Chemical reaction kinetics in relation to glass transition temperatures in frozen food polymer solutions. 1993. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740610109>
- 15 Roos Y, Karel M. Applying state diagrams to food processing and development. *Food Technol.* 1991 Dec;45(12):66, 68-71, 107

20

Estudio de la microestructura y sus propiedades de aleaciones nano-estructuradas base Al obtenidas por diferentes técnicas de solidificación rápida

M. Pichipil

Universidad de Buenos Aires, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Instituto de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería "Hilario Fernández Long" (INTECIN), Facultad de Ingeniería, Paseo Colón 850, C1063ACV C.A.B.A., Argentina.

Introducción

En las últimas décadas se han desarrollado aleaciones de Al con características microestructurales particulares y propiedades mecánicas muy superiores a los materiales convencionales. En particular las aleaciones amorfas y nanoestructuras de base aluminio han despertado un gran interés científico y tecnológico [Ino-98, Kim-00, Ino-00] en aplicaciones de alto valor agregado como ser la industria automotriz, aeronáutica y espacial. Estos sistemas en general llevan como primer aleante el Ni o el Fe y como segundos aleantes suelen emplearse el itrio y lantánidos o los metales refractarios (ETM: early transition metals), [Ino-98]. Siendo el Fe el que produce una mayor variedad de microestructuras y como resultado una amplia gama de propiedades; mientras que los segundos aumentan la capacidad de formación de fases cuasicristalinas icosaédricas, convierten a los sistemas Al-Fe-ETM en los de mayor potencial para el control microestructural mediante variaciones de la composición y de la cinética de enfriamiento [Aud-03].

Por otro lado, mediante las técnicas de Solidificación Rápida (SR) se pueden obtener una gran variedad de microestructuras que pueden combinar fases cristalinas, amorfas y cuasicristalinas a escala nanométrica. Los procesos de SR involucran altas velocidades de enfriamiento ($10^4 - 10^8$ K/s) y permiten obtener materiales en forma de polvos, laminas, escamas o cintas, con granos amorfos, cuasicristalinos y / o cristalinos con microestructuras refinadas y solubilidad sólida extendida de sus elementos constituyentes [Kar-11]. Sin embargo para su aplicación como material estructural estas aleaciones necesitan ser

obtenidas en volumen por medio de procesos tales como extrusión de material solidificado rápidamente [Ino-01] o para ciertas composiciones por procesos de inyección a presión desde el estado líquido en moldes sobre-enfriados [Ino-01, Aud-13]. Estas aleaciones también podrían aplicarse como material de superficie, como ser recubrimientos, a través de una serie de procesos muy diferentes, tales como Deposición desde la fase vapor [Guz-00], Deposición asistida por ablación laser [Cop-02], Deposición y Fusión laser [Aud-98b, Aud-99] y técnicas de Spray Térmico [Don-08] entre otras.

En la actualidad el desarrollo de las aleaciones nano-estructuradas de Aluminio tienen dos objetivos generales:

- i) Reducir las etapas del Proceso Tecnológico, y
- ii) Desarrollar Aleaciones para Trabajos a Elevada Temperatura,

En ambos casos se busca obtener aleaciones con buenas propiedades mecánicas y buen comportamiento frente a la corrosión.

Hasta el presente el desarrollo fue basado en la obtención final de excelentes propiedades mecánicas, habiéndose dejado en un plano secundario el comportamiento a la corrosión [Ino-98]. Sin embargo, dada la complejidad de estos procesos y los pocos estudios realizados sobre aleaciones nanoestructuras de Al [Dav-91, Fra-93], se requiere de un estudio sistemático de estos sistemas para definir las composiciones y condiciones de procesado más convenientes para el desarrollo de aplicaciones tecnológicas. Por lo tanto, es necesario analizar la influencia de la microestructura y de los elementos aleantes sobre la corrosión electroquímica en un medio determinado.

En este trabajo se presentan algunos de los resultados obtenidos del estudio de una serie de aleaciones de Al producidas por diferentes tecnologías de SR con características microestructurales diferentes y determinar su posible aplicación como material de superficie. Para ello se estudiarán las propiedades de superficie con preponderancia en el comportamiento frente a la corrosión electroquímica y se diseñarán procesos de elaboración de superficies que puedan ser aplicados industrialmente.

En particular se presentan los resultados obtenidos de estudiar el efecto de la fase amorfa como fase promotora de la protección frente a la corrosión electroquímica y el efecto de las fases cuasicristalinas como material para aplicaciones tribológicas.

Materiales analizados

Se estudian dos grupos de aleaciones base Aluminio:

A.- Aleaciones Amorfas y Nano-Estructuradas Obtenidas por Solidificación Rápida y Moderada

Se desarrollan y/o evalúan procesos de manufactura para la elaboración de materiales con microestructuras en superficie resistentes a la corrosión, empleando una serie de Aleaciones del tipo Al-ETM-LTM (ETM: early transition metals, LTM: later transition metals). Para ellos se emplearon diferentes procedimientos metalúrgicos:

- 1- **Melt Spinning:** Proceso de **Solidificación Rápida** (velocidad de enfriamiento de 10^6 C/seg) a partir del cual se materiales en forma de cintas con fases amorfas y cuasicristalinas en su microestructura.
- 2- **Atomización Gaseosa**, con velocidades de enfriamiento entre 10^3 y 10^5 C/seg. Se obtiene un material en forma de polvo cuya microestructura presenta fases amorfas o de dimensiones nanométricas.

3- **Inyección en Molde de Cobre Refrigerado**, con velocidades de enfriamiento menores a las conseguidas en las técnicas anteriores. Se obtienen piezas con espesores del orden del mm con heterogeneidades microestructurales en forma normal a la superficie de enfriamiento. Encontrándose una microestructura más fina en la superficie que en el centro de la pieza.

B.- Recubrimientos Cuasicristalinos para Aplicaciones Tribológicas

1.- Se estudian tres aleaciones cuasicristalinas depositadas mediante “*Oxygen-fuel combustion flame*”, “*Plasma Spray*” y “*High velocity oxygen-fuel (HVOF)*”, sobre una aleación comercial de Al-7Si empleando equipos de Spray Térmico industrial.

Resultados y conclusiones parciales

A-1.a Solidificación Rápida - Aleaciones: $\text{Al}_{90}\text{Fe}_7\text{Nb}_3$ (at%) - $\text{Al}_{90}\text{Fe}_7\text{V}_3\text{Ti}_3$ (at%) :

Ambas aleaciones producidas por Melt-Spinning con iguales velocidades de enfriamiento presentan un comportamiento micro-estructural diferenciado. La aleación ternaria presenta una microestructura totalmente amorfa mientras que la aleación cuaternaria una micro-estructura formada por nanogranulos amorfos embebidos en una matriz de solución sólida de α -Al.

Mediante tratamientos térmicos de recocidos ambas aleaciones fueron totalmente cristalizadas. Se observa en ambos casos que el comportamiento frente a la corrosión en solución de cloruros de las aleaciones amorfas o nanogranulares amorfas es siempre mejor que el comportamiento de sus contrapartes cristalinas. Las Figuras 1.a-1,a-2) y b-1,b-2), presenta los difractogramas de rayos X de las aleaciones antes y después del recocido isotérmico y las curvas de polarización potenciodinámicas de todas las muestras.

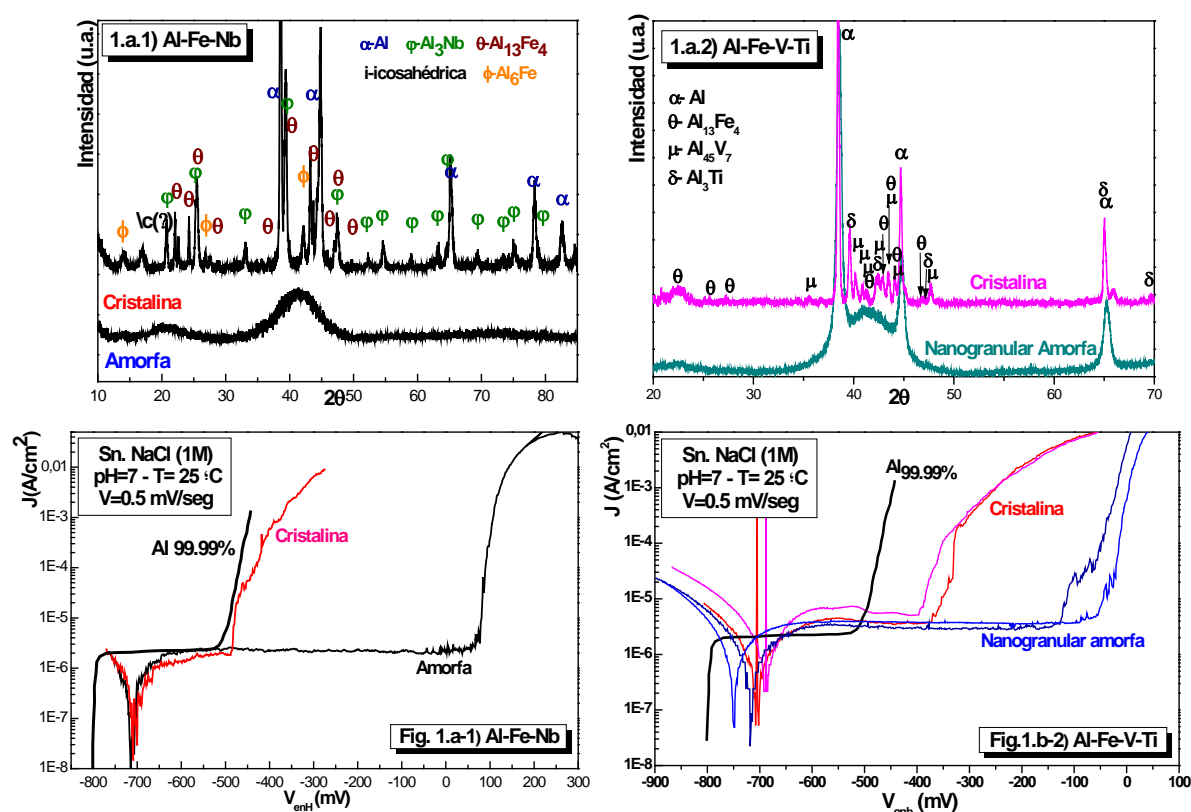


Fig. 1.a-1) a-2) Curvas de polarización potenciodinámicas de cintas del sistema Al-Fe-Nb y Al-Fe-V-Ti, respectivamente y **b-1) b-2)** Difractogramas de rayos X de cintas del sistema Al-Fe-Nb y Al-Fe-V-Ti, respectivamente

A-1.b Solidificación Rápida - Aleación $\text{Al}_{88}\text{Ni}_8\text{Y}_4$ (at%):

El estudio de la aleación $\text{Al}_{88}\text{Ni}_8\text{Y}_4$, producida por Melt-Spinning y su aplicación como Recubrimiento por laminación en frío sobre una aleación de Al comercial (aleación Al-1050), mostró que el proceso de laminación en frío permite conservar la microestructura con fase amorfa lograda por la SR.

El grado de deformación por laminación aplicado (50% reducción del espesor) permite lograr una buena adherencia del recubrimiento formado por cintas de Al-Ni-Y, colocadas en forma alternadas Cara Rueda/Cara Aire (CR-CA) sobre la superficie de la aleación comercial. Las Figuras 2.a) y b) presentan las microfotografías de imagen óptica y de electrones secundarios, donde se observa la zona de unión entre cintas y las bandas de deslizamiento formadas sobre esta superficie. No se observaron zonas descubiertas. Se presentaron micro-fisuras sólo sobre la CR, que no alcanzan a tocar la superficie del material substrato.

El recubrimiento obtenido tiene un mejor comportamiento frente a la corrosión en solución de NaCl-1M, pH=7 a 26°C que el material substrato (Al-1050) consistente en mayores potenciales de corrosión y de picado y una zona de pasivación más extensa. (Figuras 2.c)

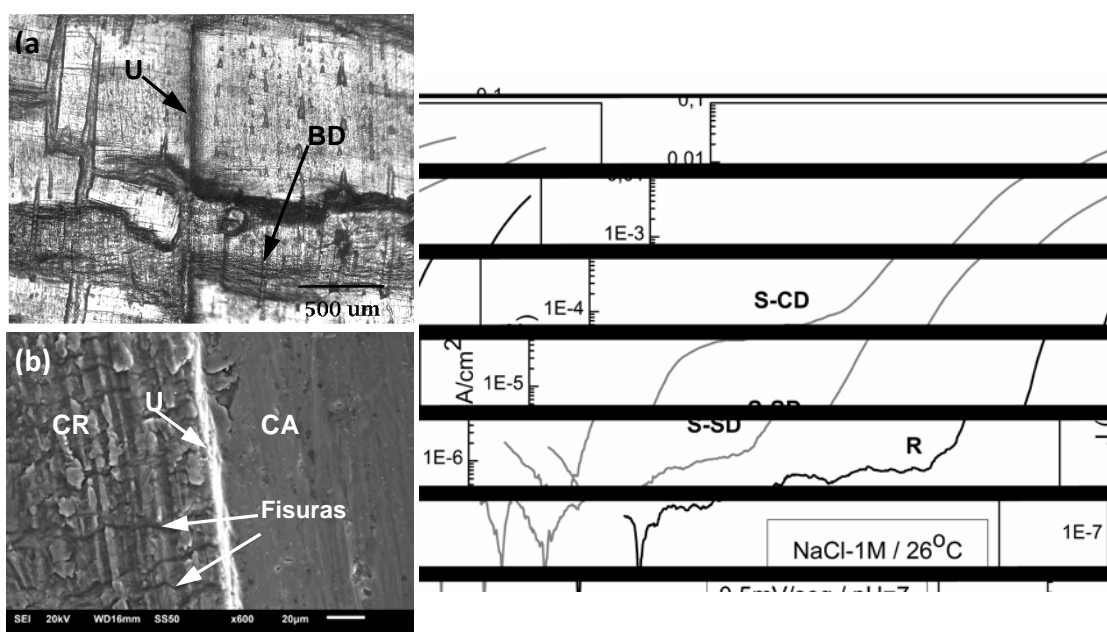


Fig. 2 –Fotomicrografías de la superficie del recubrimiento: **(a)** Imagen óptica, **(b)** Imagen de electrones secundarios. U: unión, BD: bandas de deslizamiento, CR: cara rueda, CA: cara aire. **(c)** Curvas de polarización potenciodinámicas del Recubrimiento (R), del substrato sin deformación (S-SD) y con deformación plástica por laminado (S-CD).

A-2 Aleaciones obtenidas por Atomización Gaseosa

Se obtuvieron por Atomización Gaseosa polvos de cuatro aleaciones, tres utilizadas para realizar recubrimientos por Thermal Spray: Al-Cu-Fe-Cr, Al-Co-Fe-Cr y Al-Cu-Fe; y una

cuarta utilizada con diversas técnicas con diferentes velocidades de enfriamiento: Al-Fe-V-Ti. Los polvos obtenidos consistieron un partículas esféricas regulares de de tamaño variable, fácilmente separables, sin coalescencia. (Fig. 3)

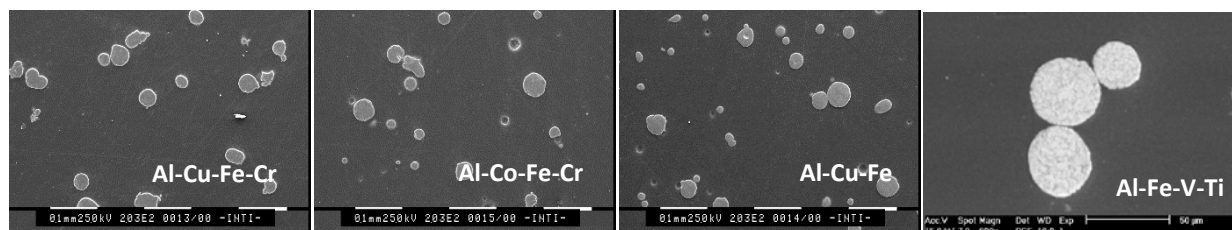


Fig. 3 -Imágenes de Electrones Secundarios de materiales en Polvo empleados para recubrimientos y con diferentes velocidades de enfriamiento.

Los polvos utilizados para recubrimientos presentaron un tamaño variable entre los 20 μ m-50 μ m. En los tres casos, los Difractogramas de rayos X presentan fases cuasi-cristalinas y cristalinas en su micro-estructura. La Figura 4, presenta los resultados obtenidos para los tres polvos en comparación al de un material cintas SR con mayor porcentaje de fases cuasi-cristalinas.

Las muestras de Al-Fe-V-Ti consistieron en polvos que fueron tamizados y separados en 4 grupos por tamaño: inferior a los 45 μ m, entre 45 μ m-75 μ m, 75 μ m-180 μ m y mayor a 180 μ m. En todos los casos, las partículas presentaron fases cristalinas estables y meta-estables en su micro-estructura. En la Fig. 4, se presenta el difractograma de las partículas en polvo de tamaño menor.

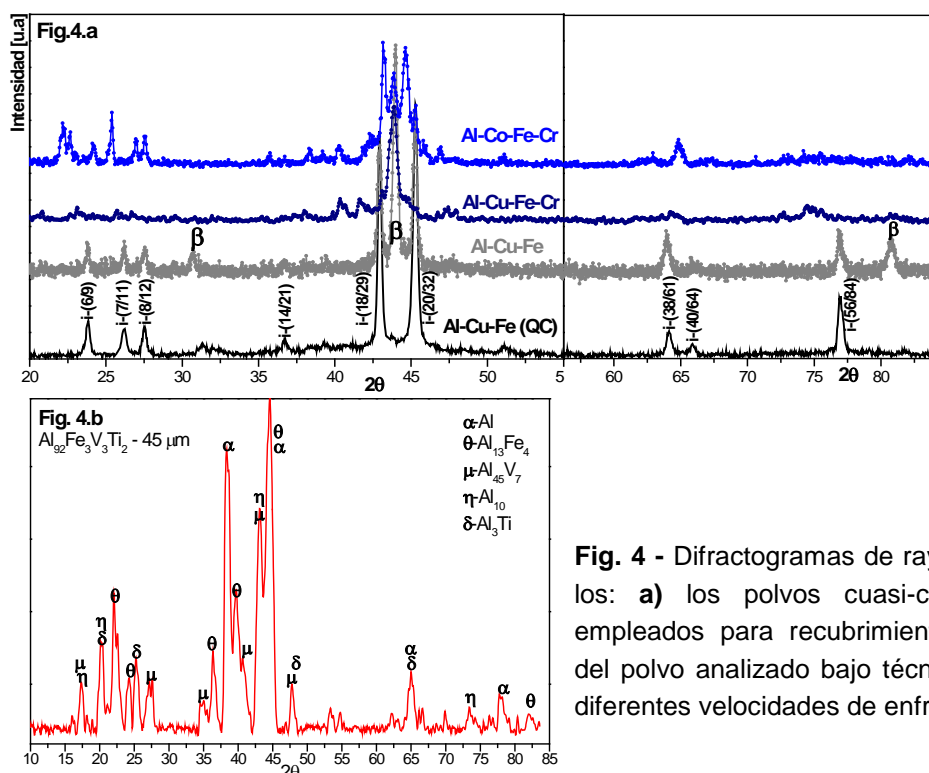


Fig. 4 - Difractogramas de rayos X de los: **a)** los polvos cuasi-cristalinos empleados para recubrimientos y **b)** del polvo analizado bajo técnicas con diferentes velocidades de enfriamiento

A-2 Inyección - Aleaciones $Al_{92}Fe_3V_3Ti_2$, $Al_{90}Ni_5Ce_5$ y $Al_{93}Fe_3Cr_2Ti_2$ (at%)

Se observó que las tres muestras presentan un gradiente de micro-estructuras tanto a lo largo del eje de la cuña como en sentido transversal con importante reducción del tamaño

de las fases hacia la punta de la cuña. Lo cual se refleja en un creciente aumento de la microdureza con la reducción de tamaño de las fases presentes.

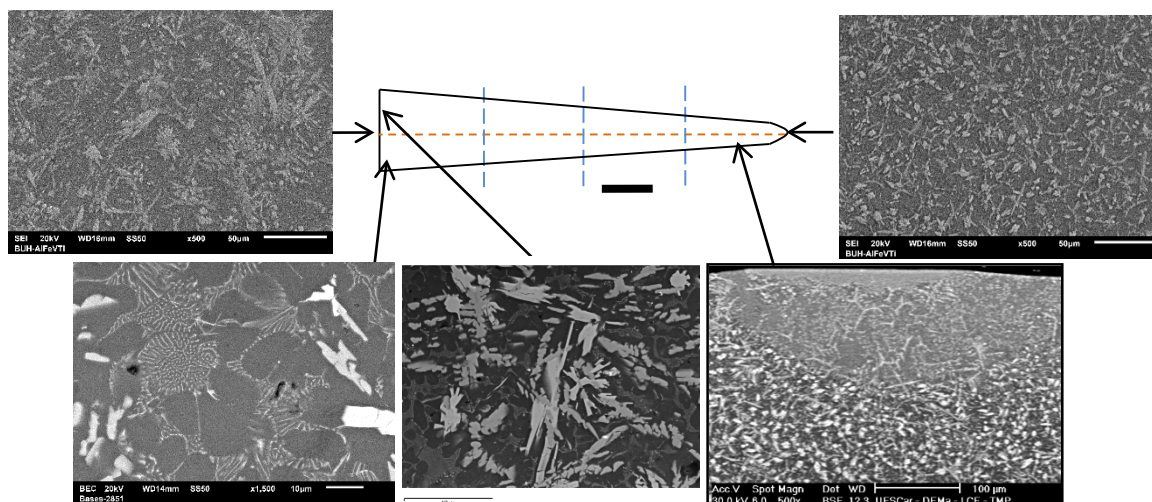


Fig. 5.- Imágenes de electrones retrodispersados (BEC) en distintos sectores de la cuña Al-Fe-V-Ti

La Figura 5 presenta las imágenes SEM, obtenidas en la cuña Al-Fe-V-Ti, en la punta, en la base y detalles en la superficie y la base. Resultados similares se obtuvieron en las otras muestras.

Las curvas de polarización en la base de las cuñas (Fig. 6), muestran que la muestra Al-Ni-Ce presenta un proceso de corrosión uniforme desde el Pot. De corrosión electroquímica. Las muestras cuaternarias, sin embargo presentaron zona de pasivación con una extensión similar en ambos caso. Por lo que las muestras con Ti mostraron una mejor resistencia a la corrosión que la muestra ternaria. En particular la muestra Al-Fe-V-Ti, presentó una zona de pasivación con la menor corriente de pasivación respecto de la muestra Al-Fe-Cr-Ti.

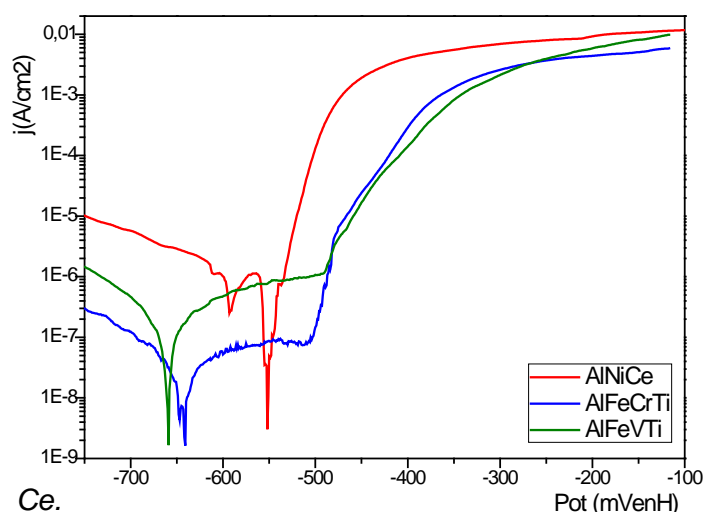


Fig. 6.- Curvas de polarización tomadas en la base de las cuñas Al-Fe-V-Ti, Al-Fe-Cr-Ti y Al-Ni-

B- Recubrimientos Cuasicristalinos

Las técnicas de Spray Térmico, fácilmente adaptables a procesos de producción, brindan una oportunidad de generación de recubrimientos cuasi-cristalinos para

aplicaciones industriales [Yos-95, Eis-97]. En el presente trabajo se empleó un sustrato de aleación Al-7Si, la cual es utilizada comúnmente en muchos productos industriales masivos. Los recubrimientos se realizaron mediante el empleo de las técnicas de “*Combustion Flame*”, “*High Velocity Oxygen Fuel*” (HVOF) y “*Plasma Spray*” con equipos industriales. Estas técnicas consisten básicamente en proyectar, sobre un sustrato sólido, metal fundido en forma de gotas a alta velocidad (Fig. 7). La diferencia fundamental en estos procedimientos radica en el mecanismo por el cual los polvos de aleación son fundidos y la velocidad con la que es expulsado hacia el material sustrato [Han-06, Sto-08].

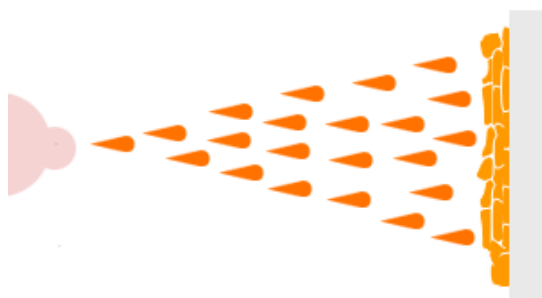


Fig. 7.- Esquema representativo de las Técnicas de Spray Térmico utilizadas.

El estudio realizado sobre la producción de recubrimientos cuasicristalinos de Al-Cu-Fe-Cr, Al-Fe-Cr-Co y Al-Cu-Fe sobre Al-7Si empleando la técnica de Thermal Spray, demostró que la calidad de los recubrimientos es de alta calidad para diferentes aplicaciones tribológicas, si se utiliza Plasma Spray y HVOF. En ambos casos se obtienen recubrimientos con fases cuasicristalinas, aunque cabe destacar que la calidad de los recubrimientos por HVOF fue mejor. En la Figura 8.a, se presentan los XRD de los recubrimientos obtenidos mediante las tres técnicas empleando polvos cuasicristalinos de Al-Cu-Fe-Cr. En la Figura 9 se presenta la imagen de electrones retrodifundidos (BSE) de un corte del recubrimiento obtenido mediante HVOF, (b), y los espectros EDX representativos de las zonas claras con fases cristalinas y de la matriz cuasicristalina, (c).

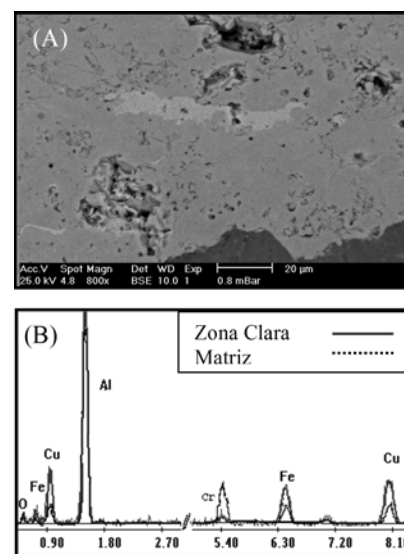
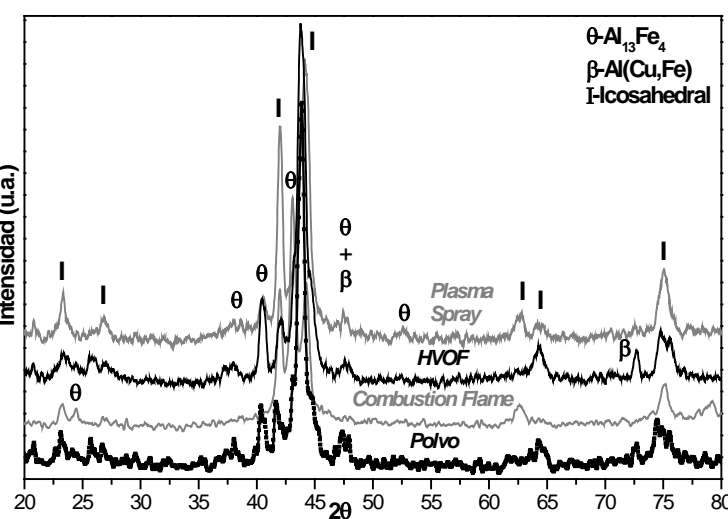
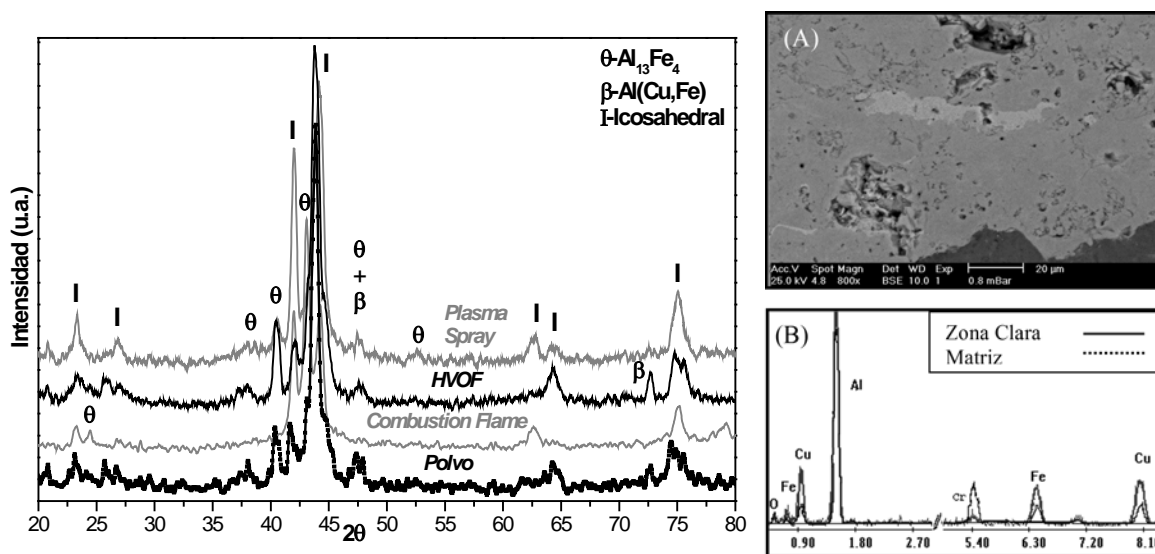


Fig. 8.- a) Difractogramas de Rayos X de los recubrimientos obtenidos empleando el polvo Al-Cu-Cr-Fe mediante las diferentes técnicas, Imagen de b) electrones retordifundidos y c) Espectros EDX de un corte del recubrimiento obtenido por HVOF.

Los recubrimientos obtenidos con esta técnica han resultado en general de espesores más gruesos que los producidos por *Combustion Flame* con el mismo número de pasadas. Presentaron buena adherencia al sustrato y no se observaron fisuras para recubrimientos debajo de los 300 μm de espesor. La porosidad fue menor que la observada en los recubrimientos obtenidos mediante las técnicas de *Combustion Flame* y *Plasma Spray*. Similar a lo ocurrido en los recubrimientos obtenidos por aquellas técnicas, se observaron zonas claras en la microestructura que se corresponden a fases cristalinas, con una composición diferente a la de la matriz cusicristalina (Figura 8.a).

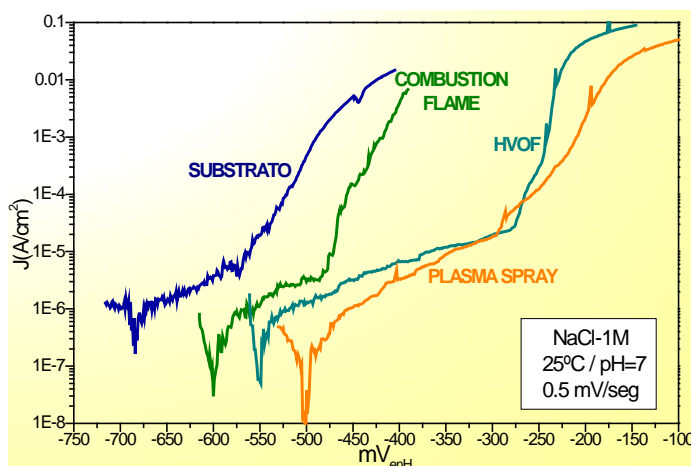


Figura 9.- Curva de polarización potenciodinámica de los recubrimientos obtenidos por diferentes técnicas empleando Al-Cu-Fe-Cr y del material del sustrato (Al-7Si) en NaCl-1M.

La figura 9 presenta los resultados de las curvas de polarización potenciodinámicas obtenidas sobre los recubrimientos con Al-Cu-Fe-Cr. Los recubrimientos obtenidos con aleaciones cuasicristalinas mejoran el comportamiento frente a la corrosión de la aleación Al-7Si, desplazando el potencial de corrosión en un valor entre 110 y 180 mV; y desplazando el potencial de corrosión acelerada en un valor entre 90 y 295 mV. Los mejores resultados, respecto al comportamiento frente a la corrosión se obtuvieron empleado las técnicas de Plasma Spray y HVOF.

Estos resultados preliminares indican que mejorando las condiciones de deposición a fin de reducir la porosidad y evitar la formación de microfisuras, estos recubrimientos serían aptos para aplicaciones tribológicas, mejorando la resistencia a la corrosión y al desgaste de las aleaciones de Aluminio.

Referencias

- [Ino-98] A. Inoue, Progress in Materials Science 43 (1998) 365.
- [Aud-03] F. Audebert. “*Properties and Applications of Nano-crystalline Alloys from Amorphous Precursors*”; NATO Advanced Materials Research Series, Kluwer Acad. Publ. (Submitted, September 2003).
- [Kim-00] H. M. Kimura, K. Sasamori and A. Inoue; Mater. Scie. Eng., A 294-296 (2000) 168.
- [Ino-00] A. Inoue, H. Kimura and T. Zhang; Mater. Scie. Eng. A 294-296 (2000) 727.
- [Kar-11] E. Karaköse, M. Keskin. Materials and Design 32 (2011) 4970-4979.

- [Ino-01] A. Inoue and H. Kimura; J. Light Met. 1 (2001) 31.
- [Aud-13] F. Audebert, M. Galano, C. Triveño Rios, H. Kasama, M. Peres, C. Kiminami, W. J. Botta, C. Bolfarini. Journal of Alloys and Compounds 577 (2013) 650-657.
- [Guz-00] L. Guzman, M. Adami, W. Gissler, S. Klose, S. De Rossi. Surface and Coating Tech 125 (2000)218
- [Cop-02] J. Copola, F. Audebert, S. Duhalde. Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials 14-14 (2002) 27-32.
- [Aud-98b] F. Audebert, R. Colaço, R. Vilar, H. Sirkin. Revista de Metalurgia 34-2 (1998) 183.
- [Aud-99] F. Audebert, R. Colaço, R. Vila, H. Sirkin. Scripta Materialia 40-5 (1999) 551-557.
- [Don-08] E. Dongmo, M. Wenzelburger, R. Gadow. Surface and Coating Tech 202 (2008) 4470
- [Dav-91] G. Davis, W. Moshier, G. Long and D. Black; J. Electrochem. Soc. 138 (1991) 3194.
- [Fra-93] G. Frankel, R. Newman, C. Jahnes and M. Russak; J. Electrochem Soc. 140 (1993) 2192.
- [Yos-95] A. Yoshioka, K. Edagawa, K. Kimura and S. Takeuchi. Jpn. J. Appl. Phys. 34 (1995) 1606.
- [Eis-97] T. Eisenhammer and A. Trampert. Phys. Rev. Lett. 78-2 (1997) 262.
- [Han-06] P. Hanneforth, Advanced Materials & Processes, Vol 164, ASM International, (2006) 14.
- [Sto-08] J. Stokes, in "*Theory and Application of the High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Thermal Spray Process*", Chapter 9: *HVOF Spraying Procedure*. Dublin City University, (2008) 146

21

Heteroestructuras basadas en nanopartículas magnéticas

Rivas Rojas Patricia¹, Tancredi Pablo¹,
Moscoso Londoño Oscar², Socolovsky Leandro³

¹ Laboratorio de Sólidos Amorfos, INTECIN. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires

² Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia

³ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Cruz; CIT Santa Cruz, CONICET. Río Gallegos, Argentina

Introducción

Las nanopartículas son estructuras cuyos tamaños son del orden de la mil millonésima parte de un metro, las cuales han atraído gran interés en el mundo científico tecnológico durante las últimas décadas debido a la aparición de propiedades magnificadas y novedosas que, combinadas con una gran relación superficie volumen, las posiciona como materiales altamente útiles en una amplia gama de aplicaciones.

Una alternativa especialmente interesante es la construcción de nanoestructuras con de más de un material, en vista de combinar las propiedades extraordinarias de cada uno. En este sentido fueron preparadas por métodos químicos nanopartículas formadas por un único núcleo de óxido de hierro y una cáscara de sílice amorfa, partiendo de un ferrofluido en un medio orgánico.

La transferencia de fase de nanopartículas hidrofóbicas por la formación de una cáscara química y mecánicamente resistente, es una alternativa interesante como primer paso de modificación superficial que permita la creación de estructuras más complejas y funcionales, aprovechando la conocida versatilidad de los compuestos organosilanos. A través de este método se obtienen partículas de tamaño y morfología homogénea, proveyendo un sistema que puede utilizarse como modelo para estudiar fenómenos del magnetismo en la nanoescala.

Objetivo General

- Preparar y caracterizar heteroestructuras conformadas por nanopartículas de óxido de hierro recubiertas de sílice de dimensiones controlables.

Objetivos Específicos

- Sintetizar nanopartículas de óxido de hierro de tamaños controlables, con distribuciones de forma y tamaño muy estrechas.

- Recubrir por métodos químicos las nanopartículas de óxido de hierro con cáscaras de sílice de espesor controlable, logrando un núcleo por cáscara y distribuciones de forma y tamaño muy estrechas.
- Aplicar técnicas de caracterización morfológica, estructural y magnética a los sistemas preparados para analizar.
- Estudiar las propiedades magnéticas de dichos sistemas y relacionarlas con la nanoestructura y morfología.
- Evaluar los efectos de tamaño y proximidad entre los núcleos en las propiedades magnéticas del sistema.

La motivación de esta investigación está enmarcada en poder desarrollar nanomateriales de características muy controladas con un equipamiento sencillo y económicamente favorable y estudiar sus propiedades para evaluar su aplicabilidad. En este sentido se plantea combinar dos materiales bien conocidos en dimensiones convencionales y que se están investigando en dimensiones nanométricas, con propiedades interesantes, como lo son el magnetismo de los óxidos de hierro y la versatilidad química del óxido de silicio, con variaciones sistemáticas para cuantificar sus efectos en las propiedades macroscópicas del sistema. Debido a la gran cantidad de muestras obtenidas, solo se presenta a modo ilustrativo todos los estudios realizados para una de las tres familias de muestras preparada.

Síntesis química de las heteroestructuras deseadas

Tres familias de nanopartículas, denominadas P, M y B, formadas por un único núcleo de óxido de hierro y cáscaras de sílice amorfa de espesor variable fueron preparadas por métodos químicos. En cada caso, primero se obtuvo un ferrofluido de nanopartículas monodispersas de óxido de hierro cubiertas con ácido oleico, por la descomposición térmica de precursores orgánicos[1]. La cobertura orgánica se aprovechó para promover el intercambio de ligandos en un proceso de microemulsión inversa, permitiendo transferir las partículas a la fase polar, donde ocurre de manera confinada la hidrólisis y condensación de TEOS ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$) y se forma una cáscara de SiO_2 amorfo sobre cada nanopartícula[2], la figura 1 muestra esquemáticamente los distintos pasos de la síntesis.

Los parámetros de síntesis fueron variados para obtener diferentes tamaños de núcleos, tales como la rampa de calentamiento en el proceso de descomposición térmica, la relación molar ácido oleico-oleato de hierro y la atmósfera empleada. En el caso de los espesores de cáscaras, se variaron la cantidad de TEOS empleada y los tiempos de reacción.

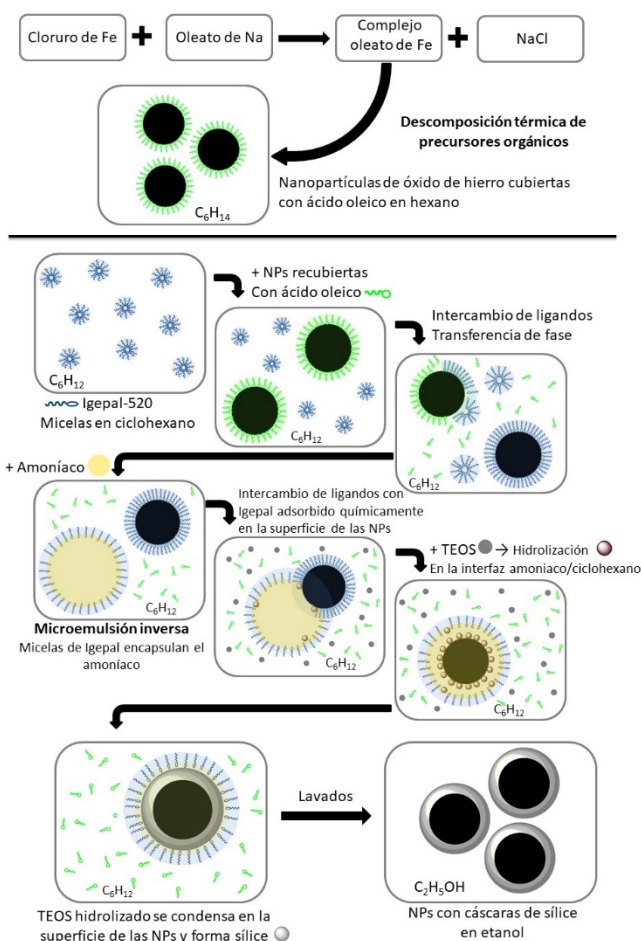


Figura 1. Esquema de formación de las nanoestructuras[8]

Los precursores de hierro y proporciones empleadas para la síntesis de las nanopartículas correspondieron a las necesarias para la obtención de magnetita, sin embargo la formación de otras fases no puede ser descartada[3], por esta razón se realizó una caracterización estructural y morfológica exhaustiva, así como también para identificar la formación de las arquitecturas deseadas.

Caracterización estructural y morfológica

- *Difracción de Rayos-X*: fue empleada para identificar las fases cristalinas formadas en cada muestra. El óxido de hierro de interés en este trabajo, la magnetita, cristaliza en una estructura denominada cúbica espinela, de grupo espacial $Fd3m$ cuya celda unidad está conformada por 32 iones de oxígeno arreglados en una red cúbica centrada en las caras que forman 96 intersticios con dos tipos de simetría local: tetraédrica y octaédrica. Estos intersticios suelen denotarse como sitios A y B respectivamente, permitiendo representar la estructura con la fórmula unitaria AB_2O_4 , y van a ser ocupados por iones metálicos de valencia 2^+ y 3^+ .

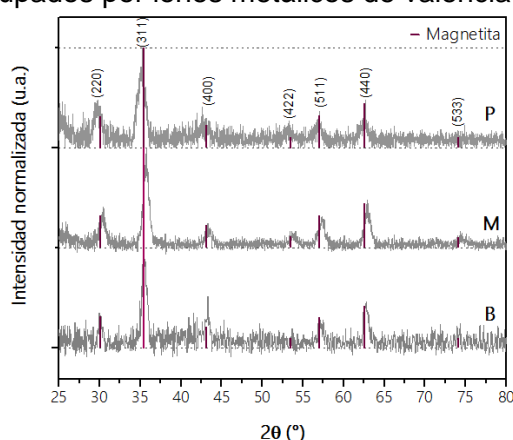
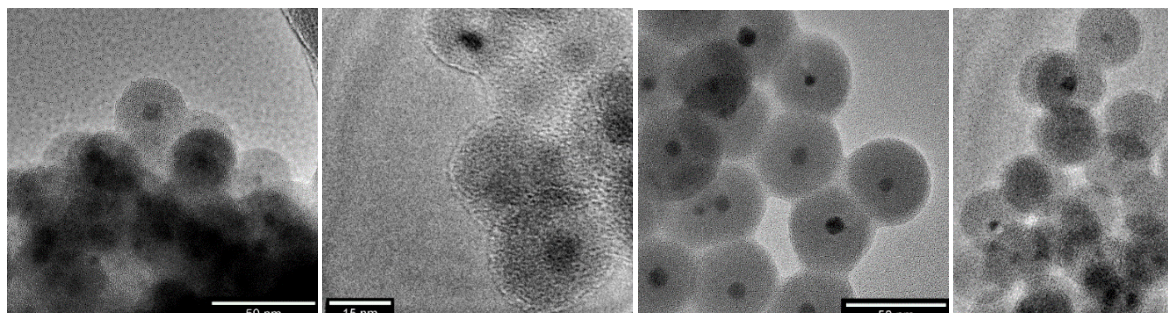


Figura 2. Patrones de difracción de rayos X normalizados, correspondientes a las muestras obtenidas por descomposición térmica. Se muestra el patrón de la magnetita como referencia y su respectiva indexación.

En los patrones de difracción obtenidos se puede observar la formación únicamente de la fase cúbica espinela, grupo espacial $Fd-3m$, con características esperadas para muestras nanoestructuradas, tal como el ensanchamiento de los picos. Si bien se presenta como referencia el patrón de magnetita, los picos e intensidades relativas son equivalentes en el de la maghemita, por lo tanto la formación de esta fase no puede ser distinguida por este método. Pequeños corrimientos de los picos obtenidos, respecto a los de la ficha cristalográfica pueden atribuirse a errores de desplazamiento de la muestra sobre el portamuestras, dado que se emplean cantidades muy pequeñas de material, insuficiente para abarcar toda la región iluminada por los rayos X. Esto dificulta la posibilidad de cuantificar posibles tensiones en la muestra, otra de las posibles causas del corrimiento de los picos en los patrones de difracción. Se analizó el ancho a mitad de altura del pico principal de cada patrón para obtener a partir de la ecuación de Scherrer[4] el tamaño de cristalita y compararlo posteriormente con los tamaños obtenidos por otros métodos.



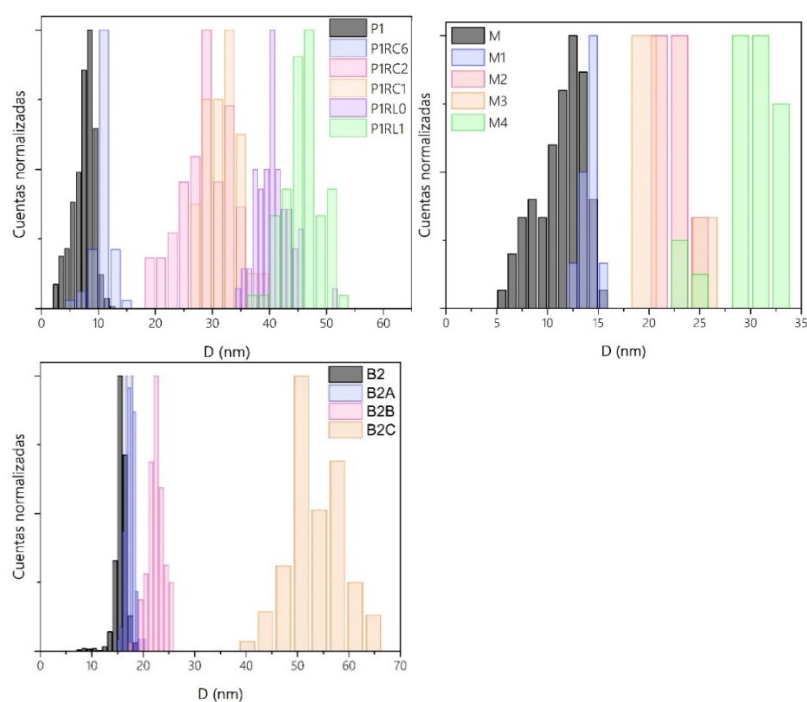


Figura 3. Imágenes TEM obtenidas para algunas muestras de la familia P (sup). Histogramas para todas las familias (inf)

- Microscopía electrónica:** fue empleada para identificar la formación de las estructuras deseadas y para hacer un análisis de la distribución de tamaños de núcleos y espesor de cáscaras en cada muestra. Para las partículas sin cáscara, la gran cantidad de material orgánico sobre las partículas dificultó su apropiado lavado para poder ser analizadas por estas técnicas, solo para el caso de B2 se pudo obtener imágenes de las partículas desnudas. Por otro lado, la diferencia de densidad electrónica entre el óxido de hierro y la sílice, permitieron observar y medir a partir de la microscopía electrónica de transmisión, la formación de las estructuras tipo núcleo-cáscara, contando con un único núcleo por cáscara y presentando uniformidad y homogeneidad en forma y tamaño para todos los casos.

Todas las muestras presentaron las mismas características, a modo ilustrativo se muestran a continuación algunas micrografías para muestras de la familia P, y los histogramas de tamaño normalizados para todas las muestras, obtenidos a partir del análisis de las imágenes.

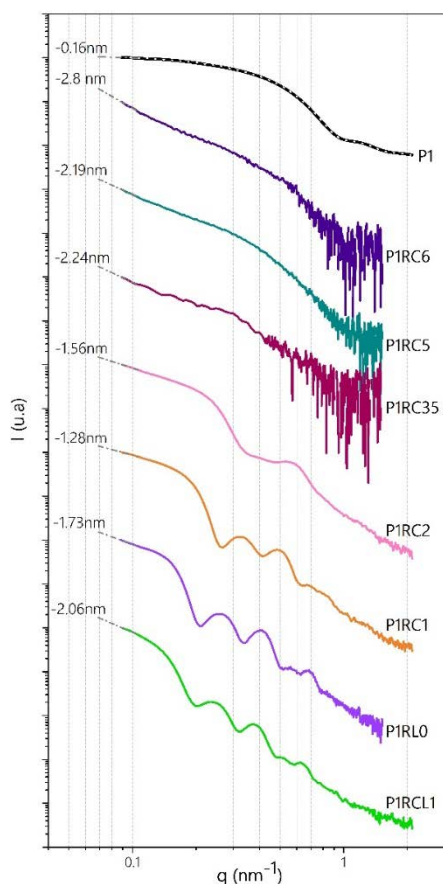


Figura 4. Curvas de SAXS para muestras de familia P representada en escala log-log.

- De acuerdo con la revisión literaria, estudios de la dispersión de Rayos-X tan sistemáticos como el que aquí se presenta, no han sido reportados. Este análisis permite, con mayor alcance estadístico que otras técnicas, estudiar la morfología y uniformidad de las muestras preparadas. A continuación se presentan los patrones obtenidos para la familia P, en los cuales se pueden apreciar rasgos característicos de sistemas globulares bien dispersos.

A medida que aumenta el tamaño de la estructura a estudiar (de arriba hacia abajo en la figura), se puede observar cómo las oscilaciones aparecen para valores de q cada vez más pequeños. El número e intensidad relativa de las oscilaciones está relacionado con la dispersión y homogeneidad de las estructuras en suspensión, y la pendiente a altos q con la suavidad de las interfaces.

Mediante el uso de dos programas de computadora: McSAS[5,6] y SASView[7], se obtuvieron ajustes para los patrones de varias de las muestras, en base a un modelo de esferas en el caso de los núcleos, o de partículas esféricas tipo núcleo-cáscara, para las muestras recubiertas. Los parámetros obtenidos de dichos ajustes (tamaño de las partículas, espesor de las cáscaras y dispersiones) son coherentes con lo encontrado con las otras técnicas de caracterización.

Caracterización Magnética

A cada una de las muestras obtenidas se les realizaron distintas caracterizaciones magnéticas, tales como magnetización en función del campo magnético, magnetización en función de temperatura y susceptibilidad magnética AC. Dado que todas las muestras preparadas están compuestas por nanopartículas magnéticas cuyo tamaño se encuentra por debajo del tamaño crítico para la formación de multidominios magnéticos de la magnetita y de óxidos de hierro similares, todos los comportamientos observados en la caracterización magnética pueden relacionarse con el comportamiento superparamagnético. Tanto para incrementos en el tamaño, como para el incremento de las interacciones dipolares entre partículas, se observa de manera general tendencias sistemáticas y coherentes en los parámetros que pueden obtenerse de las curvas de magnetización en función de la temperatura.

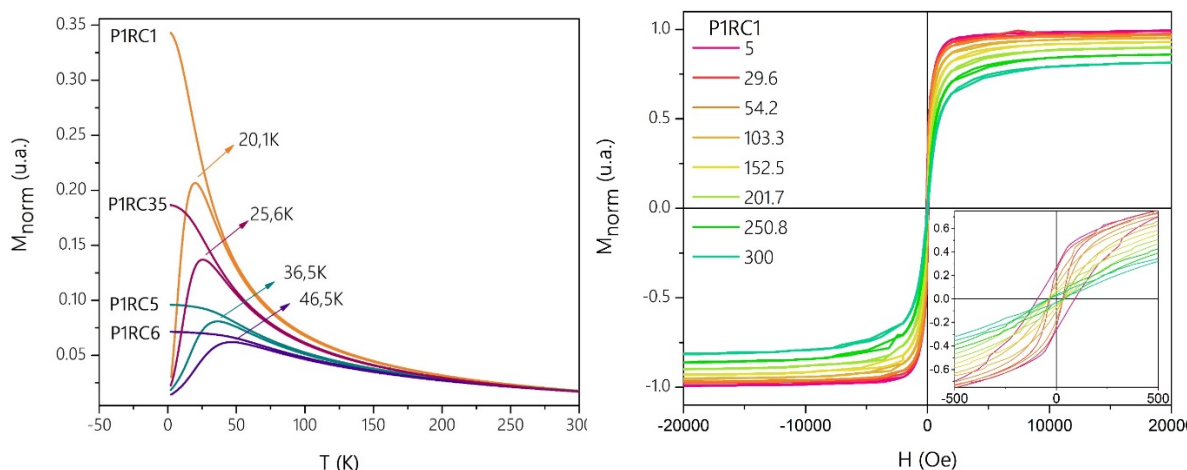


Figura 5. Curvas de magnetización en función de la temperatura (izq.) y en función del campo (der.) para muestras de la familia P.

Para las tres familias los comportamientos observados fueron similares, y el estudio de las propiedades magnéticas con la variación en el espesor de las cáscaras de sílice arrojó los resultados esperados para sistemas gradualmente más interactuantes. Los parámetros de mayor interés son representados en función de la distancia centro a centro. Se presenta un gráfico de la dependencia de los parámetros T_{\max} y T_B para la familia P.

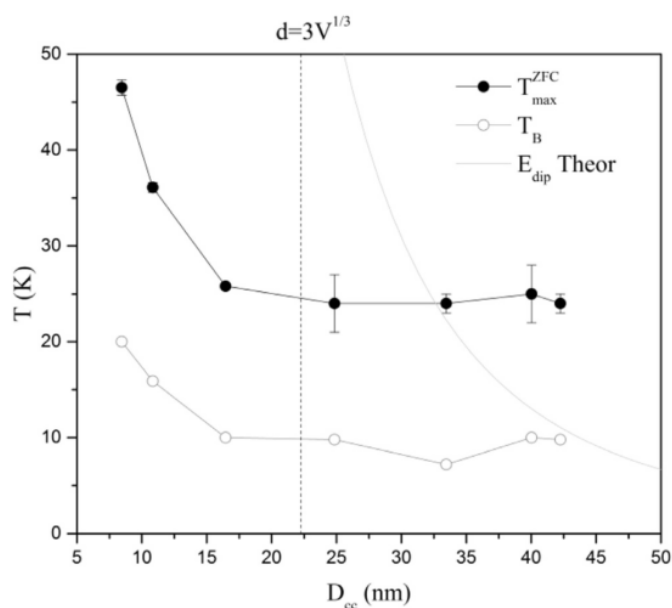


Figura 6. Representación de los principales parámetros extraídos de la caracterización magnética, en función de la distancia entre los núcleos magnéticos para la familia P en conjunto con valores teóricos calculados.

Conclusiones

A lo largo de esta tesis se llevó a cabo un estudio sistemático de la síntesis y caracterización de nanopartículas magnéticas de óxido de hierro, recubiertas con una cáscara de sílice amorfo con el fin de evaluar el efecto de las interacciones entre partículas a medida que se varía la distancia entre ellas, mediada por el espesor de las cáscaras, así como también el efecto de tamaño de los núcleos magnéticos.

La caracterización estructural y morfológica corroboró la formación de las arquitecturas deseadas: las nanopartículas monodispersas de óxido de hierro recubiertas de ácido oleico de tres tamaños diferentes, obtenidas en una primera instancia mediante variaciones en las condiciones de síntesis de la descomposición térmica de precursores orgánicos, seleccionadas en base a las referencias bibliográficas consultadas: rampa de calentamiento, tiempo en el plateau, relación molar entre el oleato de hierro y el ácido oleico y la atmósfera de reacción. Posteriormente se caracterizaron las nanopartículas tipo núcleo-cáscara obtenidas tras el recubrimiento de los núcleos magnéticos. Nuevamente, los efectos de variar los parámetros durante la síntesis: cantidad de TEOS y tiempo de reacción, son relacionadas con las características de las estructuras obtenidas. De acuerdo con lo observado en las micrografías, en todos los casos las muestras son homogéneas, estando cada núcleo recubierto por una cáscara uniforme de sílice y solo para una muestra se observa la formación de partículas de sílice sin núcleo. La información de los tamaños de partícula obtenida por difracción de rayos X, microscopía y SAXS es complementaria y consistente, corroborando que la estrategia seguida para controlar las características morfológicas dio los resultados esperados.

Por último, a partir de los análisis magnéticos se identificaron regiones con distintos grados de interacción, alcanzando una distancia a partir de la cual los efectos de las interacciones dipolares se vuelven despreciables. El estudio de estos sistemas es clave para identificar las propiedades físicas de sistemas que pueden ser orientados a aplicaciones tecnológicas. La cáscara de sílice no solo ofrece un marco de estudio, sino también un recubrimiento química y mecánicamente resistente que le aporta versatilidad a la heteroestructura, permitiendo aplicar este tipo de sistemas en entornos muy diversos.

Referencias

- [1] J. Park, K. An, Y. Hwang, J.-G. Park, H.-J. Noh, J.-Y. Kim, J.-H. Park, N.-M. Hwang, T. Hyeon, Ultra-large-scale syntheses of monodisperse nanocrystals., *Nat. Mater.* 3 (2004) 891–5. doi:10.1038/nmat1251.
- [2] H.L. Ding, Y.X. Zhang, S. Wang, J.M. Xu, S.C. Xu, G.H. Li, Fe₃O₄@SiO₂ Core/Shell Nanoparticles: The Silica Coating Regulations with a Single Core for Different Core Sizes and Shell Thicknesses, *Chem. Mater.* 24 (2012) 4572–4580. doi:10.1021/cm302828d.
- [3] P. Tancredi, P.C. Rivas Rojas, O. Moscoso Londoño, U. Wolff, V. Neu, C. Damm, B. Rellinghaus, M. Knobel, L.M. Socolovsky, Synthesis process, size and composition effects of spherical Fe₃O₄ and FeO@Fe₃O₄ core/shell nanoparticles, *New J. Chem.* 41 (2017) 15033–15041. doi:10.1039/C7NJ02558K.
- [4] P. Scherrer, Bestimmung der Größe und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen, (n.d.). doi:0.1007/978-3-662-33915-2.
- [5] B.R. Pauw, J.S. Pedersen, S. Tardif, M. Takata, B.B. Iversen, Improvements and considerations for size distribution retrieval from small-angle scattering data by Monte Carlo methods, *J. Appl. Crystallogr.* 46 (2013) 365–371. doi:10.1107/S0021889813001295.
- [6] I. Bressler, B.R. Pauw, A.F. Thünemann, McSAS: software for the retrieval of model parameter distributions from scattering patterns, *J. Appl. Cryst.* 48 (2015) 962–969. doi:10.1107/S1600576715007347.
- [7] SasView, (n.d.). <http://www.sasview.org/>.
- [8] P.C. Rivas Rojas, P. Tancredi, O. Moscoso Londoño, M. Knobel, L.M. Socolovsky, Tuning dipolar magnetic interactions by controlling individual silica coating of iron oxide nanoparticles, *J. Magn. Magn. Mater.* 451 (2018) 688–696. doi:10.1016/j.jmmm.2017.11.099.

22

Memorias no-volátiles empleando vidrios calcogenuros

Rocca Javier Alejandro¹, Fontana, Marcelo¹,
Golmar Federico^{2,3} y Ureña María Andrea¹

¹ Universidad de Buenos Aires. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Instituto de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería "Hilario Fernández Long" (INTECIN). Facultad de Ingeniería. Buenos Aires, Argentina.

² Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de San Martín. San Martín, Buenos Aires, Argentina.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina.

Resumen

Las memorias de cambio de fase (PCM) son memorias electrónicas no volátiles que utilizan vidrios calcogenuros como material sensible, basando su funcionamiento en la capacidad de los mismos para conmutar, en forma reversible entre dos estados, amorfo y cristalino. Mediante estímulos eléctricos sobre una celda del material se puede tanto inducir la conmutación entre estados, como distinguirlos, es decir, escribir y leer datos binarios.

Su estudio ha cobrado relevancia por la potencialidad para aventajar a tecnologías de almacenamiento en dispositivos electrónicos de consumo masivo, como las memorias *flash* (basada en transistores MOS), en términos de velocidades de lectura y escritura, tiempos de retención de datos, y consumo energético. También son promisorias en aplicaciones específicas que requieren mejorar el rendimiento del acceso a memoria y en aquellas que requieren operar en ambientes hostiles, de interés en las industrias militar y aeroespacial.

El objetivo científico del trabajo de tesis es profundizar el conocimiento en esta temática estudiando nuevos materiales, sus propiedades estructurales, térmicas y de transporte eléctrico. En vistas a su aplicación en el almacenamiento de información, el aporte tecnológico consiste en el diseño, construcción y optimización por técnicas de microfabricación de prototipos de celdas de memoria del tipo PCM.

Introducción

Los vidrios calcogenuros (VC) son sólidos amorfos que tienen un elemento del grupo VI de la tabla periódica, denominados calcógenos, entre sus componentes mayoritarios: S, Se ó Te. En la actualidad, las aplicaciones tecnológicas de los VC son muy diversas, entre ellas: monitoreo de medio ambiente y procesos industriales, almacenamiento de energía, transmisión y almacenamiento de datos. Esto se debe a la gran variedad de propiedades que presentan dependiendo en cada caso de la composición y el método de obtención de la muestra. Las composiciones típicamente estudiadas pueden incluir elementos de los grupos IV (Si, Ge) y V (As, Sb), y diversos metales (como Ag, Cu, Li, Cd, entre otros). En

cuanto a su conformación, se pueden obtener fácilmente tanto en volumen, en fibras o como películas delgadas, lo que los hace buenos candidatos para ser utilizados como materiales activos en la microfabricación de dispositivos, empleando la tecnología de los MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) [1].

Las propiedades ópticas, electrónicas y estructurales de los VC con metales en su composición están íntimamente relacionadas con el bajo número de coordinación del calcógeno [2]. Poseen buena transmisividad en el infrarrojo, altos índices de refracción y fotosensibilidad que permiten el desarrollo de elementos tales como lentes y guías de ondas usados en el infrarrojo [3]. Pueden comportarse como semiconductores o como conductores iónicos rápidos [4, 5, 6]. El intercambio de iones en interfase y el cambio de conductividad eléctrica por adsorción de gases en superficie es aplicable al desarrollo de sensores de iones [7] y sensores de gases [8], respectivamente. La capacidad para difundir iones en presencia de campo eléctrico da lugar a principios de funcionamiento de baterías de electrolitos sólidos (almacenamiento de energía) y celdas de metalización programable (almacenamiento de datos) [9]. Este trabajo centra su atención en una de las aplicaciones más notables de los VC: las memorias no volátiles de cambio de fase.

La capacidad para almacenar información ha sido un aspecto importante del desarrollo de la humanidad y el siglo pasado fue testigo de la irrupción de diversas nuevas técnicas para el almacenamiento de enormes cantidades de datos. En la década de los 60, se observó que los VC podían realizar una rápida conmutación entre dos estados estructurales: amorfo y cristalino, y consecuentemente una variación significativa de sus propiedades físicas (por ejemplo: valores de conductividad eléctrica y/o reflectancia óptica). Este cambio de estado se logra cíclicamente ya sea bajo la acción de un impulso eléctrico [10] o de un pulso láser [11]. Los dos estados poseen propiedades drásticamente diferentes lo que permite así la codificación de la información binaria.

La primera aplicación comercial basada en esta propiedad de conmutación de los VC surge en la década de los 90 con los soportes ópticos regrabables (DVD-RW) de composición $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ [12]. Posteriormente [13] se comenzó a desarrollar un nuevo tipo de memorias electrónicas no-volátiles en las cuales el cambio entre los estados amorfo y cristalino se realiza usando el calentamiento por efecto Joule y detectando el cambio de resistividad del material. A estas memorias de "cambio de fase" (*phase-change memory*) se las conoce como PCM o P-RAM. En estos dispositivos, mediante la aplicación de un pulso eléctrico largo de baja intensidad, se calienta en forma localizada el material en estado amorfo (de alta resistencia) y se induce la cristalización del mismo disminuyendo la resistencia eléctrica en varios órdenes de magnitud. Posteriormente, la aplicación de otro pulso de mayor intensidad y menor duración conduce a la fusión local y a partir de un enfriamiento rápido, nuevamente a la formación del estado amorfo.

Los primeros materiales estudiados con vistas a estas aplicaciones fueron aleaciones buenas formadoras de vidrios, entre las que se destacan la de composición eutéctica $\text{Ge}_{15}\text{Te}_{85}$, que fue dopada con Sb, S o P [10]. Aunque estos materiales mostraron el efecto de conmutación eléctrica, el tiempo para la cristalización fue del orden de microsegundos, resultando muy elevado para una aplicación de almacenamiento electrónico. Los primeros materiales que mostraron una rápida re-cristalización y buen contraste óptico fueron GeTe [14] y $\text{Ge}_{11}\text{Te}_{60}\text{Sn}_4\text{Au}_{25}$ [15]. Esto permitió el descubrimiento del sistema pseudobinario $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$, con los compuestos $\text{Ge}_1\text{Sb}_4\text{Te}_7$, $\text{Ge}_1\text{Sb}_2\text{Te}_4$ y $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ [12] y otros relacionados como GeSbTeN , GeSnSbTe , GeBiSbTe , GeBiTe y GeInSbTe [16, 17], con muy buenas propiedades. También se encontró otra familia de aleaciones con destacables propiedades, basadas en la composición Sb_2Te_3 y con Ag, In o Ge como dopantes [18].

En la Tabla 1 se resumen las principales propiedades que deben satisfacerse para estas aplicaciones [19].

Propiedad requerida	Especificación
Alta velocidad en la transición de fase	Inducida por un láser o pulso eléctrico de nanosegundos de duración
Gran estabilidad térmica de la fase amorfa	Al menos varias décadas a temperatura ambiente
Gran diferencia en las propiedades ópticas entre los dos estados (para almacenaje óptico)	Considerable diferencia en el índice de refracción o el coeficiente de absorción
Gran cambio en la resistencia eléctrica entre los dos estados (para memorias no-volátiles)	Considerable diferencia en la resistencia eléctrica (de 3 a 5 órdenes de magnitud)
Gran número de ciclos reversibles	Más de 100.000 ciclos con composición estable
Alta estabilidad química	Baja reactividad ante la humedad ambiente y frente a contactos metálicos

Tabla 1

Desarrollo experimental

Se depositaron películas delgadas por ablación láser (*pulsed laser deposition*, PLD) a partir de blancos con diferentes composiciones del sistema Ge-Sb-Te (expresadas en fracción atómica): $\text{Ge}_{13}\text{Sb}_5\text{Te}_{82}$ (cercanas al eutéctico $\text{Ge}_{15}\text{Te}_{85}$), $\text{Ge}_1\text{Sb}_2\text{Te}_4$, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, $\text{Ge}_1\text{Sb}_4\text{Te}_7$ (en el sistema pseudobinario $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$) y $\text{Sb}_{70}\text{Te}_{30}$. Se sintetizaron muestras en volumen, a partir de la mezcla de los elementos puros en la estequiometría adecuada y su homogeneización en horno dentro de tubos de cuarzo evacuados [20]. Las mismas se cortaron y pulieron hasta obtener caras paralelas que pudieran utilizarse como blancos de PLD.

Las películas se depositaron sobre sustratos de vidrio a temperatura ambiente y presión en el orden de 10^{-5} mbar en la cámara de ablación, operando un láser pulsado de Nd:YAG con longitud de onda de 355 nm, ancho de pulso de 5 ns, frecuencia de repetición de 10 Hz y fluencias de 1,1 a 1,3 J/cm².

Los espesores de las películas fueron medidos por microscopía de fuerza atómica (*atomic force microscopy*, AFM), encontrándose entre 100 y 250 nm.

Se midió la resistencia de las películas con un electrómetro de alta impedancia a través de dos puntas pegadas sobre contactos de Pt depositados por *sputtering* sobre las mismas. Las mediciones se llevaron a cabo en una celda evacuada a 10^{-2} mbar y dotada de una resistencia calefactora para realizar barridos en temperatura a velocidades de calentamiento alrededor de 3 K/min.

Muestras de cada composición fueron tratadas térmicamente hasta distintas temperaturas máximas en distintas experiencias. Tanto las muestras depositadas sin tratamiento posterior como las tratadas térmicamente fueron caracterizadas por difracción de rayos X en geometría de Bragg-Brentano con radiación monocromática de la línea K_α de Cu, a temperatura ambiente. A partir de estas mediciones se identificaron los productos de cristalización resultantes de los tratamientos térmicos.

Resultados

La evolución térmica de la resistencia de cada composición muestra una o más transiciones abruptas durante el calentamiento, en las que se producen disminuciones de algunos órdenes de magnitud en un rango pequeño de temperaturas. Dichas transiciones se asocian a cambios estructurales [21]. Las muestras que luego se enfrían lentamente permanecen

en un estado de baja resistencia, lejos del valor original (comparando ambos a temperatura ambiente).

En la Figura 1 se muestra la dependencia con la temperatura de la resistencia eléctrica en una película delgada de $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ que presenta dos transiciones abruptas cerca de 443 K y 523 K. En coincidencia con lo que se conocía para esa aleación la primera transición se asocia con una transformación entre el amorfo y la fase cristalina fcc metaestable $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, mientras la segunda corresponde a una transformación de la estructura fcc metaestable a la hexagonal estable. Las fases amorfa y metaestable se comportan como semiconductores, disminuyendo su resistencia durante el calentamiento; la fase estable tiene comportamiento metálico, pues disminuye la resistencia durante el enfriamiento. Para las otras composiciones del pseudobinario ($\text{Ge}_1\text{Sb}_2\text{Te}_4$ y $\text{Ge}_1\text{Sb}_4\text{Te}_7$) se tienen resultados análogos con dos transiciones (no incluidos en la figura).

Por otra parte, sólo se observa una transición alrededor de 445 K en la película de $\text{Sb}_{70}\text{Te}_{30}$ (que mantiene el comportamiento semiconductor durante el enfriamiento), como se muestra en la Figura 1. En la película de $\text{Ge}_{13}\text{Sb}_5\text{Te}_{82}$ se observan tres transiciones.

En la Tabla 2 se muestra para las distintas composiciones medidas: la temperatura de inicio de la primera transición T_{on1} , la temperatura de fusión T_m , el cociente entre ellas T_{on1}/T_m y el cociente entre las resistencias eléctricas medidas a temperatura ambiente antes y después del tratamiento térmico R_g/R_c .

Las temperaturas de inicio de la primera transición T_{on1} para las composiciones del pseudobinario se encuentran en buen acuerdo con trabajos de otros autores [12, 19]

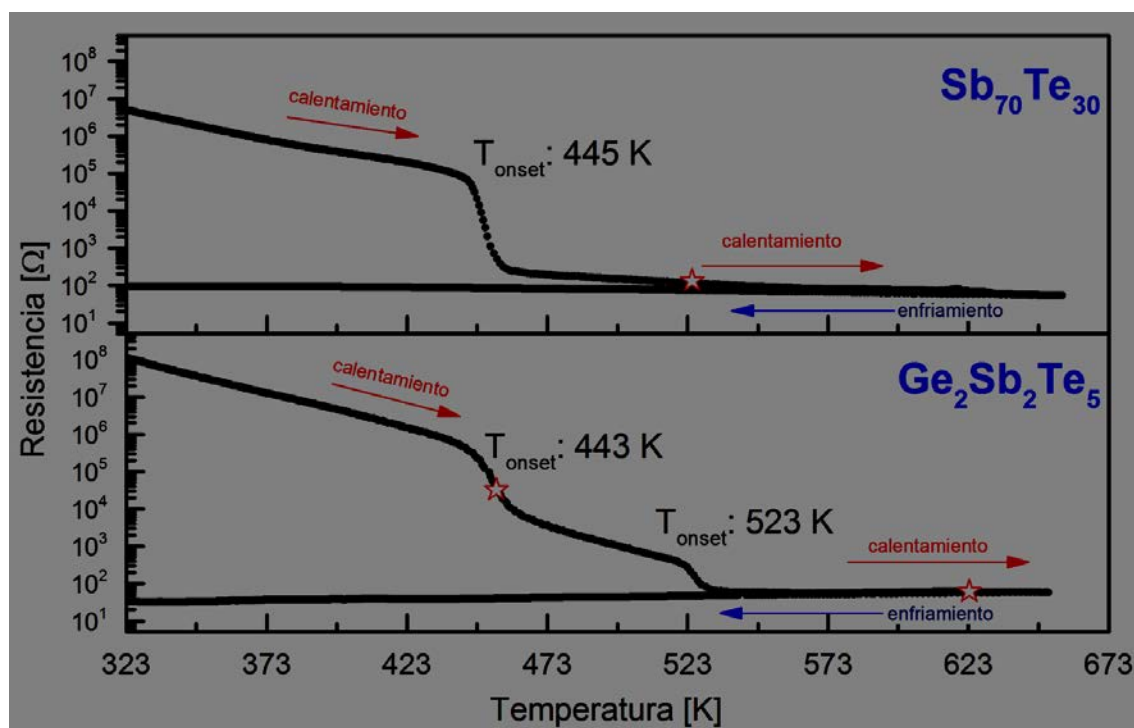


Figura 1

también aumentando con el contenido de Ge [12].

	T_{on1} [K]	T_m [K]	T_{on1}/T_m	R_g/R_c
$Ge_{13}Sb_5Te_{82}$	433	663	0,65	$2,63 \cdot 10^6$
$Ge_1Sb_4Te_7$	378	879	0,43	$7,26 \cdot 10^4$
$Ge_1Sb_2Te_4$	420	889	0,48	$5,79 \cdot 10^5$
$Ge_2Sb_2Te_5$	443	902	0,49	$3,36 \cdot 10^6$
$Sb_{70}Te_{30}$	445	817	0,54	$5,47 \cdot 10^4$

Tabla 2

R_g/R_c para la película de $Ge_2Sb_2Te_5$ supera los resultados previos en casi un orden de magnitud [22]. La resistencia eléctrica de las películas a temperatura ambiente exhibe un contraste notable en su medición previa y posterior a los tratamientos térmicos, debido a la cristalización, lo cual resulta una característica deseable para un material de cambio de fase en su aplicación a memorias.

Las figuras 2 y 3 muestran los difractogramas obtenidos a temperatura ambiente de las películas $Ge_2Sb_2Te_5$ y $Sb_{70}Te_{30}$ respectivamente tal como son depositadas y luego de alcanzar las temperaturas máximas indicadas en la Figura 1.

Los difractogramas de la película de $Ge_2Sb_2Te_5$ tal como es obtenida luego de depositada corresponde principalmente a un patrón característico de una fase amorfa con algunas trazas de la fase cristalina fcc metaestable $Ge_2Sb_2Te_5$ [21]. Cuando alcanza una temperatura de 454 K (después de la primera transición) muestra la fase metaestable y cuando alcanza los 623 K (después de la segunda transición) sólo muestra la fase estable hcp $Ge_2Sb_2Te_5$. No se muestran los resultados análogos de las otras composiciones del pseudobinario.

Los difractogramas de la película de $Sb_{70}Te_{30}$ tal como es obtenida luego de depositada corresponde principalmente a un patrón característico de una fase amorfa con algunas trazas de la fase cristalina $Sb_{72}Te_{28}$ [23]. Superados los 525 K (después de la transición observada), se observa sólo el crecimiento de esa fase [23].

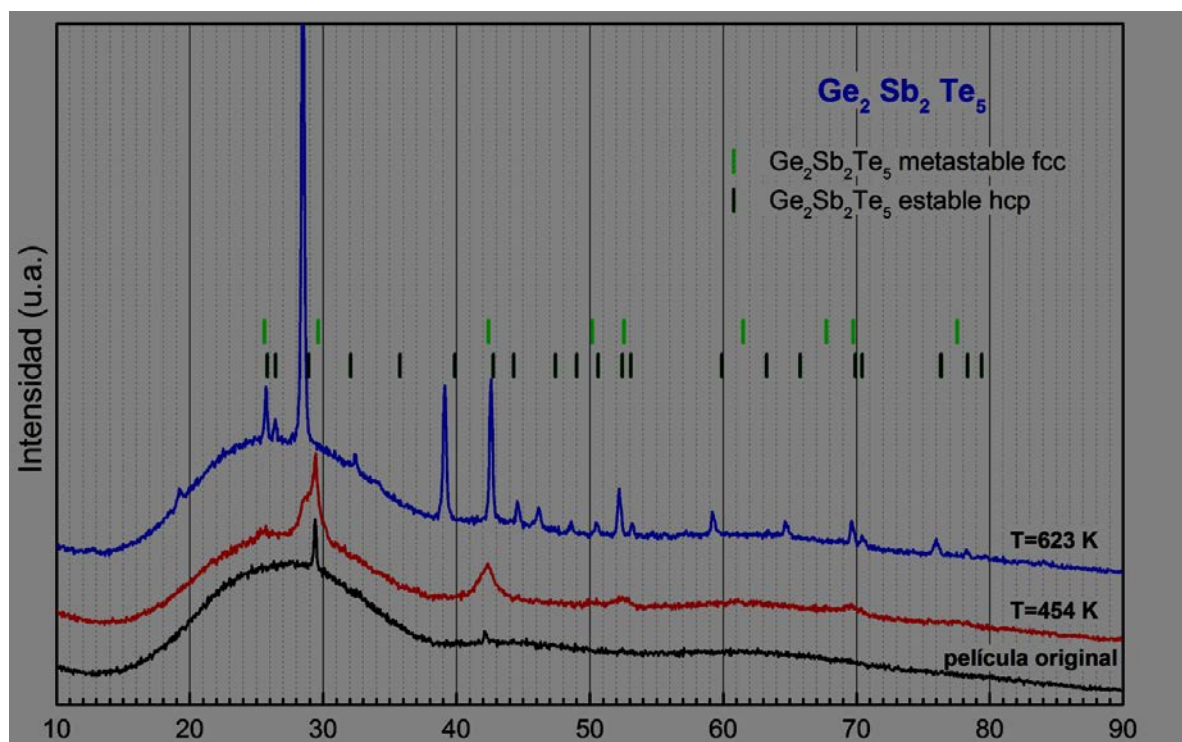


Figura 2

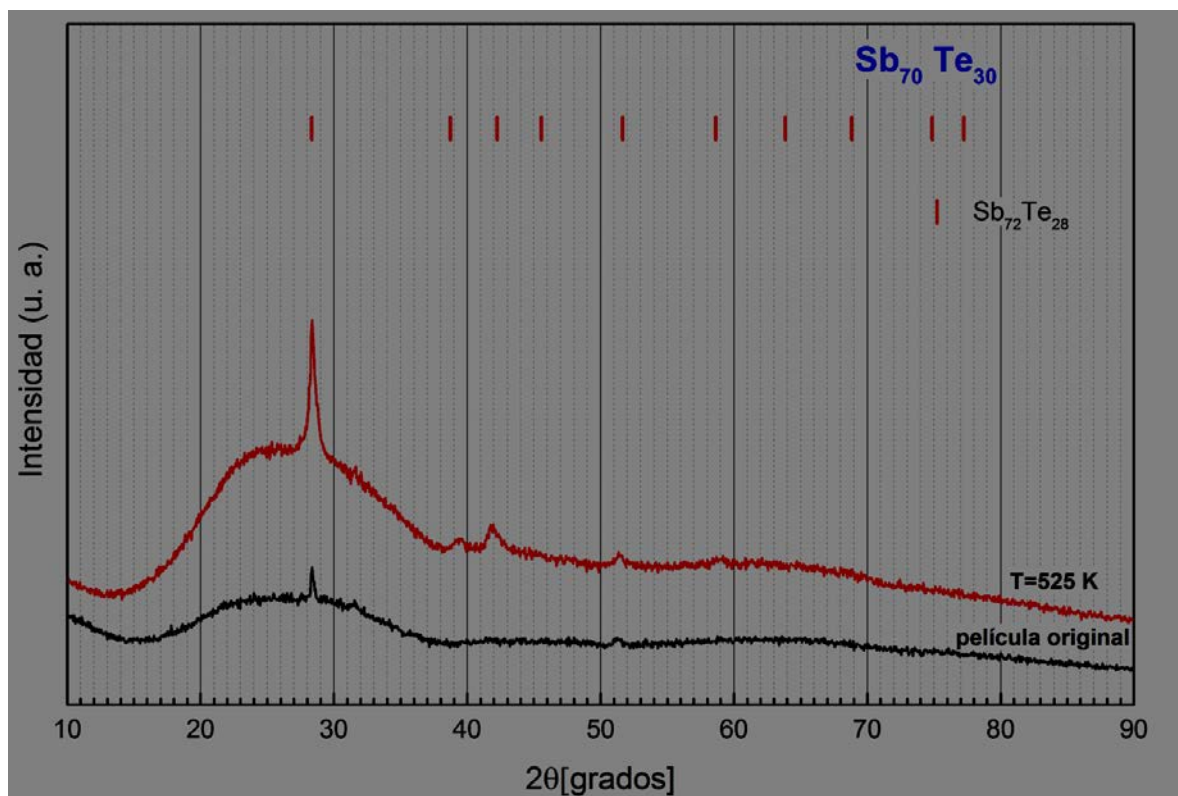


Figura 3

Conclusiones y perspectivas de trabajo

En vistas de su aplicación como memorias no volátiles, el trabajo realizado permitió comparar distintas composición del sistema Ge-Sb-Te a través de parámetros como:

- el cociente T_{on1}/T_m entre la temperatura de inicio de la primera transición T_{on1} y la temperatura de fusión T_m , relacionado con la estabilidad del amorfo, y por ello, determinante del rango de operación de la celda de memoria.
- el cociente entre las resistencias eléctricas medidas a temperatura ambiente antes y después del tratamiento térmico R_g/R_c , que determina el rango de resolución en términos de resistencia eléctrica con el que se deben distinguir los estados amorfo y cristalino.

La continuación de este trabajo prevé la consolidación de resultados en i) la fabricación de microdispositivos de memoria con películas del sistema estudiado como material sensible, y el agregado de Sn ó Ag como reemplazo de Ge; ii) la caracterización de su comportamiento eléctrico a través de estímulos que permitan observar efectos de conmutación.

Referencias

- [1] R. Fairman, B. Ushkov, Semiconducting Chalcogenide Glass III. Applications of Chalcogenide Glasses, Semiconductors and Semimetals, Vol 80, Elsevier Acad Press(2004)
- [2] P. Lucas, A. Doraiswamy, E. A. King, J. of Non-Crystalline Solids 332(2003) 35-42.
- [3] "Glasses for infrared optics", V.T. Kokorina, Ed. Marvin Weber, The CRC Press (1996).

- [4] M. Ribes, E. Bychkov, A. Pradel, *J. Optoelectron Adv. Mat.* 3 (2001) 665-74.
- [5] E. Bychkov, *Solid State Ionics* 136-137 (2000) 1111-1118
- [6] A. Ureña, A. Piarristeguy, M. Fontana, B. Arcondo, *Solid State Ionics*, 176 (2005) 505-512
- [7] Conde Garrido, J. C., Silveyra, J. M., Ureña, M. A. (2016) *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 89, 115-119.
- [8] Wüsten, J., & Potje-Kamloth, K. (2010). *Sensors and Actuators B: Chemical*, 145(1), 216-224.
- [9] Symanczyk, R. et al. Electrical characterization of solid state ionic memory elements. *Proceedings of the non-volatile memory technology symposium*. 2003.
- [10] S. R. Ovshinsky. *Phys.Rev.Let.*, 21, 1450 (1968)
- [11] J. Feinleib, J. De Neuville, S.C. Moss, S.R. Ovshinsky, *Appl.Phys Let.*, 18, 254 (1971)
- [12] N.Yamada, E.Ohno, K.Nishiuchi, N. Akahira, *J.Appl.Phys.*, 69 (1991) 2849
- [13] Hyung-Rok Oh et al. , *IEEE J. Sol. Sta. Cir.*, 41, 122 (2006)
- [14] Chen, M., Rubin, K. A. & Barton, R. W. *Appl. Phys. Lett.* 49, 502–504 (1986).
- [15] Yamada, N., Takenaga, M. & Takao, M. Te–Ge–Sn–Au phase-change recording film for optical disk. *Proc. SPIE* 695, 79–85 (1986)
- [16] Kojima, R. & Yamada, N. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1* 40, 5930–5937 (2001)
- [17] Kusada, H., Hosaka, T., Kojima R. & Yamada, N. *Proc. 18th Symp. PCOS2005* 32–35 (2006)
- [18] Kato, T. et al. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1* 41, 1664–1667 (2002)
- [19] M.Wuttig, N.Yamada. *Nature Materials* 6 (2007) 824-832.
- [20] Ureña MA, Fontana M, Arcondo B, Clavaguera-Mora MT. *Journal of Non Crystalline Solids*. 2003; 320:151-167.
- [21] Yamada N, Matsunaga T. *Journal of Applied Physics*. 2000; 88(12):7020-7028.
- [22] Cheng HY, Kao KF, Lee CM, Chin TS. *IEEE Transactions on Magnetism*. 2007; 43(2):927.
- [23] Kifune K, Kouichi Y, Matsunaga T, Yamada N. *Acta Crystallographica B*. 2005; 61(5):492-497

23

Desarrollo de nanomateriales con conductividad mixta iónica-electrónica para aplicaciones electrocatalíticas

María del Rosario Suarez Anzorena¹,
Noemí E. Walsöe de Reca¹, Susana A. Larrondo^{1,2}

¹ UNIDEF, MINDEF, CONICET, Departamento de Investigaciones en Sólidos, CITEDEF, J. B. de La Salle 4397, 1603 Villa Martelli, Pcia. de Buenos Aires, Argentina.

² Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, UNSAM, Campus Miguelete, 25 de Mayo y Francia, 1650 San Martín, Pcia. de Buenos Aires, Argentina.

La situación energética siempre fue un tema de suma importancia en la Argentina. En la actualidad, existen dos problemáticas importantes a solucionar: el aumento del consumo energético (debido al desarrollo económico y poblacional de las ciudades) y la provisión de energía en lugares remotos sin acceso a la red eléctrica. En este contexto y junto con la creciente preocupación por el cuidado ambiental, surgen los objetivos de mejorar la eficiencia de los sistemas de producción de energía y disminuir la polución asociada a éstos. Tres líneas de investigación buscan resolver este problema, una que se enfoca en la búsqueda de mejorar las tecnologías existentes, otra relacionada con la búsqueda de combustibles sustentables y otra desarrollando nuevas tecnologías de producción de energía. Dentro de esta última línea, se encuentra en auge el desarrollo de las celdas de combustible de óxido sólido, conocidas por sus siglas en inglés SOFC-Solid Oxide Fuel Cell. Éstas están formadas por tres compartimentos ánodo, cátodo y electrolito. Este último es un aislante electrónico que separa el ánodo del cátodo y que permite el paso de los iones óxido desde el cátodo hacia el ánodo. En el compartimiento catódico se aceptan los electrones del circuito externo y con éstos ocurre la reducción, generalmente del O₂ del aire. En el ánodo, ocurre la oxidación del combustible utilizando los iones óxido, que llegan desde el cátodo a través del ánodo, liberando los electrones al circuito externo. El flujo de electrones por el circuito externo desde el ánodo al cátodo es lo que cierra el circuito de cargas [1, 2].

Las celdas SOFC, poseen amplias ventajas respecto a las tecnologías tradicionales de obtención de energía. En un proceso convencional, como la generación de energía eléctrica a través de turbinas de vapor, el agua es transformada en vapor en una caldera a través de la quema de un combustible que transforma su energía química en energía térmica.

Posteriormente, el vapor ingresa a la turbina donde su expansión genera un movimiento de las hélices y su eje (energía mecánica) que, conectado solidariamente a un generador eléctrico logra producir energía eléctrica. Luego el vapor es condensado y el agua regresa a la caldera. Este ciclo de transformaciones tiene grandes pérdidas de eficiencia, estando esta última limitada por la eficiencia del ciclo de Carnot, obteniéndose eficiencias máximas cercanas al 40%. Las celdas de combustible, por el contrario, son dispositivos capaces de generar energía eléctrica a través de la oxidación electroquímica continua de un combustible que ingresa en el compartimiento anódico. Esta transformación sin procesos intermedios permite que estos dispositivos generen eficiencias cercanas al 60%. En sistemas de cogeneración, donde las celdas SOFC de alta temperatura son acopladas con una turbina de gas, se pueden lograr eficiencias máximas de 85%. El aumento se logra aprovechando el calor, generado para mantener la celda a la temperatura de operación, para producir vapor de agua y mover la turbina. Otra característica que las destaca y hace su uso interesante es que permiten la utilización de diversos tipos de combustibles como fósiles, renovables (biogás producido a través de desechos orgánicos, alcoholes) o hidrógeno sin restricciones en su calidad [3]. Esta capacidad permite que estos dispositivos sean excelentes opciones en la transición del uso de los combustibles fósiles a combustibles más verdes.

Es importante destacar también que el impacto ambiental es mucho menor al de los sistemas de generación convencionales por sus bajas emisiones de SO_x , NO_x y material particulado. Al mismo tiempo, se emiten menores cantidades de CO_2 por igual cantidad de energía generada por cualquier tecnología convencional. Las celdas son extremadamente silenciosas y no generan vibraciones al carecer de partes móviles, permiten la generación descentralizada (off-grid), son robustas y son de tamaños escalables en función de la cantidad de unidades elementales que se conecten permitiendo, junto con todas las otras ventajas anteriormente nombradas, que su instalación en áreas urbanas sea posible [2, 4]. Las celdas que trabajan a altas temperaturas (900-1000 °C) permiten, el reformado de los hidrocarburos dentro de éstas, abaratando costos de operación. Sin embargo, las altas temperaturas traen aparejadas altas exigencias de los materiales y sellos a utilizar, generan degradaciones más rápidas de las celdas, favorece la difusión entre los compartimientos del dispositivo y aumenta los tiempos de calentamiento y enfriamiento de la celda [1, 5]. Es por eso que el principal objetivo en la actualidad es lograr disminuir la temperatura de operación de estos dispositivos en un rango de 500- 750 °C. En este sentido, existen dos desafíos principales en esta tecnología que son poder insertarlas de forma masiva en el mercado resultando en una buena alternativa económica y hallar materiales adecuados como electrodos para temperaturas de operación por debajo de los 750 °C (Intermediate Temperature-SOFC, IT-SOFC).

El componente menos estudiado es el ánodo debido a la complejidad de los procesos y las múltiples reacciones que allí ocurren de las cuales aún se desconocen los procesos de reacción que intervienen, sobretodo con el uso de hidrocarburos como combustible. Para que la reacción de oxidación pueda ocurrir, es importante que confluyan en un mismo punto, el punto triple (TPB-Three Phase Boundary), la fase gaseosa (combustible), el conductor electrónico y el conductor iónico. Existen dos tipos de ánodos, los que son únicamente conductores electrónicos y los que son conductores mixtos (iónicos- electrónicos). En los primeros la reacción ocurre en los puntos triples y, por lo tanto, es importante que existan muchos puntos de contacto entre la fase gaseosa, el ánodo y el electrolito. En el caso de los ánodos con conductividad mixta, es la capacidad de conducir iones la que hace la diferencia. Ésta permite que los iones óxido provenientes del cátodo puedan difundir a través del ánodo hacia la superficie externa, lo que logra un aumento de la zona de contacto, permitiendo que la reacción suceda sobre una mayor superficie lo que se conoce como zona efectiva de reacción.

Este trabajo entonces se centra en la búsqueda de un material adecuado para ser utilizado como ánodo en las IT-SOFC y que posea conductividad mixta. Los materiales que se desarrollan deben tener las siguientes propiedades: microestructura estable durante la operación, alta superficie específica y porosidad, elevada actividad catalítica, elevada conductividad electrónica-iónica y poder operar directamente con hidrocarburos ya que a las temperaturas intermedias de trabajo, las reacciones de reformado no son termodinámicamente favorecidas. En este sentido, es importante también que estos materiales tengan baja formación de carbón [3, 5, 6]. El desarrollo de estos materiales en la escala nanométrica permite lograr materiales con elevadas relaciones área/volumen.

Existe evidencia que sugiere que las estructuras de óxidos que admiten desorden de sus iones óxido son buenos materiales para utilizar como ánodos electrocatalíticos efectivos en la reacción de oxidación total de metano [4, 7]. El óxido de cerio es un material ampliamente estudiado para este tipo de aplicaciones ya que su estructura de tipo fluorita admite este tipo de desórdenes. El catión Ce posee dos estados de oxidación +4 y +3, este cambio que es rápido y reversible le brinda al óxido de cerio la capacidad de liberar oxígeno en atmósferas reductoras y de almacenarlo en atmósferas oxidantes. Dicha propiedad, es conocida como "Oxygen Storage Capacity" (OSC) y ocurre en el rango de temperatura de 400-800 °C [8, 9]. Esta estructura también permite el dopaje del Ce por otros cationes de igual o de menor valencia. Otra ventaja de suma importancia es que este óxido evita la formación de depósitos carbonosos al utilizarlo con combustibles fósiles [2]. El estudio de este material también muestra dos grandes problemas a solucionar que son la pérdida de la morfología (textura y porosidad) con el incremento de la temperatura y la baja conductividad iónica-electrónica. En este contexto, las investigaciones a nivel mundial se centran en la búsqueda de óxidos mixtos cuyo componente base sea el óxido de cerio, modificando sus propiedades mediante la sustitución parcial del catión cerio en la estructura. Nuestro grupo de investigación decidió estudiar el dopaje de CeO₂ con Zr⁴⁺ pues se sabe que estos dos cationes forman soluciones sólidas en un amplio rango de composiciones [8]. Los resultados muestran que tanto la estabilidad térmica como la resistencia del material aumentan con el agregado de este catión de igual estado de oxidación [10]. Se encontró que el dopaje con un 10% de ZrO₂ logra las mejores actividades catalíticas y reducibilidad. Sin embargo, se observa que estos materiales siguen teniendo una baja conductividad electrónica e iónica [11, 12]. Este trabajo de tesis propone entonces utilizar como material base el sólido de composición nominal Ce_{0.9}Zr_{0.1}O₂ y doparlo parcialmente con un catión aliovalente de menor estado de oxidación, como el Sm³⁺. Se sabe que al ser el Sm y el Ce dos lantánidos, estos cationes forman soluciones sólidas en un amplio rango de composiciones [13]. La incorporación de un catión de menor estado de oxidación en la estructura genera un desbalance en las cargas positivas del óxido. Dado que debe mantenerse la electroneutralidad de la estructura del óxido mixto, se generan vacancias de oxígeno para compensar el defecto de las cargas positivas [13]. Por ejemplo, para un óxido de composición nominal Ce_{0.9}Zr_{0.06}Sm_{0.04}O_{2-δ}, las cargas positivas totales son: (4 +) * 0.9 + (4 +) * 0.06 + (3 +) * 0.04 = 3.96. Para mantener la carga total cero, la composición nominal del oxígeno debe ser tal que compense estas cargas. De esta manera, la estequiometría para el anión óxido se calcula de la siguiente forma: (2 -) * (2 - δ) = 3.96 → δ = 0.02. Resultando en un óxido mixto de composición nominal: Ce_{0.9}Zr_{0.06}Sm_{0.04}O_{1.98}. La generación de estas vacancias de oxígeno en la red aumenta como consecuencia la movilidad del ión óxido, logrando un aumento en la conductividad iónica y electrónica. En bibliografía se observa que en estos casos la conductividad iónica tiene un máximo con la composición. Koettgen et al. [13] observan que la conductividad tiene un máximo para sustituyentes con radio iónico similar al del catión cerio, como es el caso del catión Sm³⁺. Los autores muestran también que el máximo de de la conductividad se da para óxidos con composiciones nominales entre 0.1 y 0.2. La disminución de dicha propiedad con mayores valores para x, indicaría que un desorden mucho mayor de la subred del anión podría inducir la asociación de los defectos (vacancias de oxígeno) con los cationes dopantes formando

clústers que inmovilizan los iones óxido dentro de la red y en consecuencia, disminuyen la conductividad del material [13].

Por todo lo anteriormente expuesto, los objetivos de esta tesis consisten en mejorar la conductividad iónica-electrónica de los óxidos mixtos basados en $\text{Ce}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}\text{O}_2$ por la formación de vacancias en la estructura al doparlos con un catión trivalente como el Sm^{3+} , estudiar el efecto del dopado y del tamaño de cristalita en las propiedades de los ánodos y el desempeño de las IT-SOFCs y estudiar la estabilidad estructural de éstos con la temperatura.

Se sintetizaron óxidos mixtos con la siguiente composición nominal $\text{Ce}_{0.9}\text{Zr}_{0.1-x}\text{Sm}_x\text{O}_{2-\delta}$ con $0 \leq x \leq 0.1$. El método de síntesis utilizado es el de complejación de cationes con ácido cítrico el cuál se basa en la gelificación de la solución acuosa y su posterior combustión. Ésta ocurre gracias a la reacción redox entre el ión citrato que funciona como reductor y el ión nitrato, proveniente de las sales de los cationes, que funciona como agente oxidante. Como resultado de este proceso se obtienen materiales voluminosos y esponjosos de grandes superficies específicas [14]. Los polvos obtenidos fueron tratados térmicamente a 500 °C y 800°C durante 2h con una rampa de calentamiento de 10 °C/min desde temperatura ambiente. Las muestras se denominan CeZrXSmYCit500 donde X e Y son los porcentajes atómicos de los cationes dopantes Zr y Sm respectivamente, 500 es la temperatura de calcinación del proceso térmico. Los sólidos fueron caracterizados a través de ensayos de Difracción de Rayos-X (XRD), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Reducción a Temperatura Programada (TPR) y Espectroscopia de Impedancia (EIS).

La fase, la estructura de los sólidos, el tamaño de cristalita (D_v) y el parámetro de red (a) fueron estudiados por Difracción de Rayos-X. Los patrones de difracción de todas las muestras indican la existencia de una fase única correspondiente a la estructura de tipo fluorita del CeO_2 . El aumento en la temperatura de calcinación genera patrones que pueden ser asociados a sólidos más cristalinos y con mayores tamaños de cristalita (D_v). Este aumento del tamaño de cristalita se corrobora con los valores que se obtienen a través del método de Williamson-Hall [15]. Se observa además un aumento del D_v con el porcentaje de Sm en la red, especialmente para las muestras calcinadas a 800 °C. Es importante remarcar que todas las cristalitas son de tamaño nanométrico ($D_v < 40$ nm). Los parámetros de red obtenidos a partir del refinamiento de los patrones de difracción, muestran acuerdo con las predicciones de la ecuación experimental de Kim [16]. Se observa que en todos los casos el parámetro de red aumenta con el contenido de Sm, esto se debe al mayor radio iónico del catión dopante respecto al cerio y al circonio ($r_{\text{Sm}^{3+}}=0,1079$ nm; $r_{\text{Ce}^{4+}}=0,097$ nm; $r_{\text{Zr}^{4+}}=0,084$ nm) [17] y a la formación de vacancias de oxígeno que expanden la red cristalina. El aumento continuo del parámetro de red con el contenido de samario indicaría la completa incorporación del catión en la red, en acuerdo con lo que se encuentra en bibliografía.

La estabilidad morfológica y porosidad de las muestras fueron estudiadas a través de Microscopía Electrónica de Barrido. Se observa que todos los sólidos presentan formas globulares. El agregado del Sm muestra a su vez, un aumento en la rugosidad, textura y porosidad de los polvos.

La capacidad de reducción y quimisorción de los óxidos fue estudiada a través de ensayos de Reducción a Temperatura Programada. Se calentaron 40 mg de muestra en un flujo gaseoso de 50 ml.min⁻¹ con composición 5%mol de H₂ en balance de Ar con una rampa de temperatura de 10 °C.min⁻¹ desde temperatura ambiente hasta alcanzar los 900 °C. Zimicz et al. [18] muestran que los perfiles de reducción del óxido mixto $\text{Ce}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}\text{O}_2$ presenta dos picos, el primer máximo se encuentra alrededor de los 550 °C y el otro, alrededor de los 750 °C. El primer pico se asocia a la reducción del Ce^{4+} superficial y el segundo, con la reducción del Ce en el seno del material. Los resultados muestran que el corrimiento de los máximos

de los picos es muy dependiente de la temperatura de calcinación utilizada. A una temperatura de calcinación de 500 °C se observa que el aumento en el contenido de Sm disminuye la diferencia entre las áreas de los picos. Asimismo, se observa que el máximo del primer pico se corre a menores temperaturas, mientras que, únicamente para la muestra CeZr6Sm4Cit500 el segundo pico tiene este mismo comportamiento. El aumento en la temperatura de calcinación muestra que los sólidos comienzan a reducirse a temperaturas mayores produciéndose un corrimiento de los perfiles a mayores temperaturas. Se observa que la incorporación del Sm en la red genera una pérdida en la definición del primer pico lo que podría indicar que su inclusión genera cierta pérdida de superficie específica, lo que se encuentra de acuerdo con el incremento observado del tamaño de cristalita. Por otro lado, al comparar los perfiles entre los polvos se observa que el primer máximo sufre corrimientos a menores temperaturas para muestras con porcentajes de Sm mayores al 4%. Por el contrario, para el segundo pico, se observa únicamente corrimientos de los máximos a mayores temperaturas.

El porcentaje de reducción total de las muestras a 500 °C muestra que el agregado de Sm en la estructura no logra mejoras respecto al porcentaje obtenido con el óxido base CeZrCit 500. Al aumentar la temperatura de calcinación a 800 °C, se observa que la inclusión de Sm hasta concentraciones menores a un 4% logra un aumento del porcentaje de reducción. Por otro lado, la muestra CeZr6Sm4Cit presenta un aumento del porcentaje de reducción con el aumento de la temperatura y, es esta muestra, la que posee el máximo porcentaje en estas condiciones.

La caracterización del material como electrodo para celdas SOFCs se realiza a través de ensayos de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica. Esta técnica no destructiva, permite estudiar los procesos que ocurren durante la operación de la celda, las propiedades eléctricas de los materiales y las interfases entre compartimientos. Se aplica una diferencia de potencial de amplitud pequeña (20mV en este trabajo) y sinusoidal con frecuencia variable (1mHz- 1MHz en estos ensayos) asegurando la linealidad entre el voltaje y la corriente [19]. Las mediciones fueron realizadas en celdas con configuración simétricas, es decir, dos electrodos idénticos aplicados sobre la superficie de un electrolito (ánodo/electrolito/ánodo) con una temperatura óptima de pegado de 1100 °C. El electrolito es de SDC comercial y el colector de corriente que se utilizó es Ag, la cual muestra no ser electrocatalíticamente activa en las condiciones de medición. La atmósfera tiene una composición 7%mol de H₂ en N₂ en un caudal de 70ml.min⁻¹(25°C, 1 atm) humidificado con H₂O. El rango de temperaturas ensayado es de 500 °C a 750 °C con saltos de 50°C, comenzando con las temperaturas mayores y bajándola asegurando siempre la repetitividad y estabilidad de los ensayos.

La resistencia específica superficial (**ASR**) fue obtenida a través de los valores de resistencia de polarización obtenidos en cada temperatura ensayada. La fórmula de cálculo es $ASR = \frac{R_p}{2} A_e$ donde R_p es la resistencia de polarización y $A_e \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)$ es el área del electrodo. Graficando el $\ln(ASR)$ vs $1/T$, ver Figura 1, se obtiene la energía de activación de los procesos asociados al electrodo, todas del mismo valor. Se presentan los resultados al momento faltando únicamente los ensayos para las muestras CeZr8Sm2Cit 500 y CeZr4Sm6Cit 500. Analizando el gráfico se observa que un pequeño agregado de Sm en la estructura del óxido mixto (respecto al sólido base CeZrCit 500) disminuye la ASR del material obteniéndose el valor mínimo para la muestra CeZr6Sm4Cit 500 en todo el rango de temperatura. Duplicar al doble la concentración de Sm en la red, CeZr2Sm8Cit 500, resulta en un detrimento de la ASR obteniéndose los máximos valores para todo el rango ensayado. En el caso de aumentar aún más el contenido de Sm para obtener el sólido CeSmCit 500, se observa que la ASR resulta mayor que la obtenida para la muestra CeZrCit 500, pero resulta menor a la que se obtiene con el sólido CeZr2Sm8Cit 500. Los resultados estarían indicando que existe un contenido de inclusión del Sm óptimo tal de lograr la

mínima resistencia específica. Es importante destacar que la composición que al momento parece ser la óptima es aquella de composición CeZr6Sm4Cit 500 que es justamente la misma composición que se destaca en los ensayos de TPR.

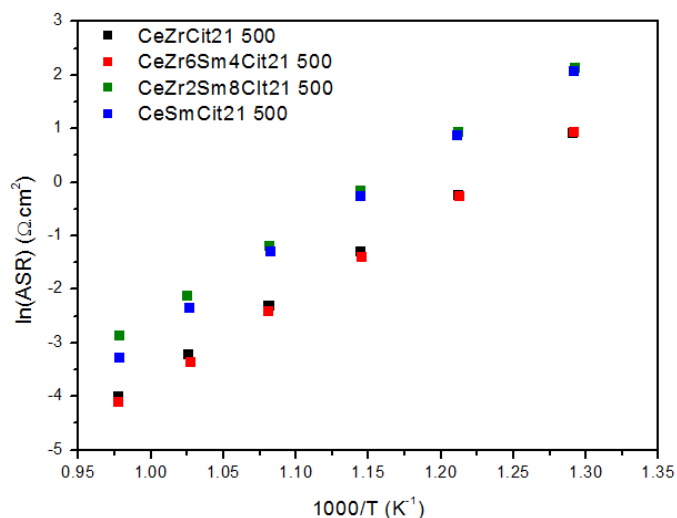


Figura 1. Gráfico de $\ln(ASR)$ vs $1/T$ obtenidos por Espectroscopia de Impedancia para los óxidos mixtos.

Se puede concluir entonces que los óxidos mixtos han sido sintetizados con éxito logrando una única fase de tipo fluorita. Los resultados al momento confirmarían la hipótesis de que el agregado de Sm en la estructura del CeZrCit 500 mejora las propiedades morfológicas, de reducción y las conductividades iónica- electrónica. Es importante remarcar también que existiría una composición de inclusión óptima tal de lograr el mejor material anódico con la mínima ASR.

Bibliografía

- [1] S. M. Haile, *Acta Materialia* 51 (2003) 5981-6000.
- [2] J.C. Ruiz Morales, J. Canales Vazquez, D. Marrero López, J. P. Martínez, D. Pérez Coll, P. Nuñez, C. Savaniu, C. Rodríguez Placeres, V. I. Dorta Martín, B. Ballesteros, *Pilas de Combustible de óxidos (SOFC)*, Gráficas Tenerife S.A, Primera Ed (2008).
- [3] J. W. Fergus, *Solid State Ionics* 177 (2006) 1529-1541.
- [4] Yamamoto, O. *Electrochim. Acta* 45 (2000) 2423-2435.
- [5] A. Jacobson, *Chem. Mater.* 22 (2010) 660- 674.
- [6] M. Khoshtinat Nikoo, N. A. S. Amin, *Fuel Process. Technol.*, 92 (2011) 678-691.
- [7] M. K. Dongare, A. M. Dongare, V. B. Tare, E. Kemnitz, *Solid State Ionics* 152-153 (2002) 455-462.
- [8] M. Yashima, *Catalysis by Ceria and Related Materials*, Cap1, A. Trovarelli, P. Fornasiero (Eds), Segunda Edición, Imperial College Press (2013).
- [9] J. Perez- Alonso, I.Melián-Cabrera, M. López Granados, F. Kapteijn, J.L. G. Fierro, *J. Catal.* 239 (2006) 340-346.
- [10] S. Larrondo, M. A. Vidal, B. Irigoyen, A. F. Craievich, D. G. Lamas, I. O. Fábregas, G. E. Lascalea, N. E. Walsøe de Reça, N. Amadeo, *Catal.Today*107-108(2005) 53-59.
- [11] M. G. Zimicz, I. O. Fábregas, D. G. Lamas, S. A. Larrondo, *Mater. Res. Bull.* 46 (2011) 850-857.
- [12] M. G. Zimicz, D. G. Lamas, S. A. Larrondo, *Catalysis Communications* 15 (2011) 68-73.
- [13] J. Koettgen, S. Grieshammer, P. Hein, B. O. H. Grope, M. Nakayama, M. Martin, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 20 (2018) 14291-14321.
- [14] A. Mali, A. Ataie, *Ceram. Int.* 30 (2004) 1979-1983.
- [15] A. Khorsand Zak, W.H Abd. Majid, M. E. Abrishami, R. Yousefi, *Solid State Sci.*, 113 (2011) 251-256.
- [16] D. Kim, *J. Am. Ceram.* 72 [8] (1989), 1415-1421.

- [17] R. D. Shannon, C. T. Prewitt, *Acta Crystallog. B* 25 (1969) 925-946.
- [18] M.G. Zimicz, D.G. Lamas, S. A. Larrondo, *Catal. Commun.*, 15 (1) (2011) 68-73.
- [19] J. R. Macdonald, E. Barsoukov, *Impedance spectroscopy, Emphasizing solid materials and systems*, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc., (1987).

24

Modificación organocatalítica de almidón para la obtención sostenible de derivados de alto valor agregado

Tupa Valencia Maribel Victoria,
Foresti María Laura y Herrera María Lidia.

Instituto de Tecnología en Polímeros y Nanotecnología (ITPN)

Resumen

La organocatálisis es una rama de la catálisis que utiliza moléculas orgánicas de bajo peso molecular como catalizadores, entre ellos, los ácidos α -hidroxicarboxílicos. En la presente contribución se emplea la ruta catalizada por un α -hidroxiácido de origen natural como es el ácido L-(+)-tartárico para la esterificación no convencional de almidón; y se explora la utilidad de la ruta propuesta para obtener almidones esterificados, particularmente almidones acetilados y propionizados para aplicaciones concretas. Entre ellas, la producción de almidones acetilados para uso como aditivo de alimentos; la obtención de almidones esterificados con ácidos grasos de cadena corta (AGCC) como fuente de almidón resistente (AR); y la preparación de películas de almidón en las que la incorporación de gránulos de almidón modificados pudieran modular las propiedades mecánicas y la permeabilidad al vapor de agua de los films.

1. Introducción

El almidón es utilizado en diversas industrias debido a su bajo costo, disponibilidad y habilidad para impartir una variedad de propiedades funcionales a productos industriales alimenticios y no alimenticios¹. Sin embargo, para determinadas aplicaciones se requiere de la modificación del almidón. La esterificación, y en particular la acetilación del almidón, es una de las modificaciones más utilizadas, que involucra la incorporación de grupos éster a la molécula de almidón, alcanzando nuevas propiedades que se encuentran muy relacionadas con el grado de sustitución (GS) logrado. El GS refiere al número promedio de grupos éster incorporados por molécula de anhidroglucosa, siendo el máximo 32.

Actualmente, la mayoría de los ésteres de almidón comerciales son producidos por reacción del almidón en medio acuoso con anhídridos, utilizando NaOH como catalizador a pH controlado (pH 7-9). Se han reportado así mismo acetilaciones de almidón mediadas por piridina, ácidos minerales, bases, iodo, ácidos de Lewis, enzimas de la familia de las lipasas, y líquidos iónicos³. En el marco del creciente interés por el uso de materiales de origen renovable y sin problemas de disposición final, en el presente trabajo se propone la

esterificación organocatalítica de almidón sin solventes agregados, usando como catalizador el ácido L-(+)-tartárico. Este α -hidroxiácido se encuentra en la naturaleza en forma libre y/o combinada en frutas como uvas, plátanos y tamarindos, y se produce a nivel industrial en nuestro país desde las primeras décadas del siglo XX. La metodología propuesta se inspira en el trabajo inicial de Hafrén y Córdoba (2005) sobre la esterificación organocatalítica de celulosa. Los almidones acetilados con diferentes grados de sustitución obtenidos se caracterizaron en términos de su estructura, morfología, estabilidad térmica, y cristalinidad. En paralelo, se estudia también el progreso de reacción dentro del gránulo de almidón. Finalmente, se explora la utilidad de la ruta propuesta para obtener almidones esterificados, particularmente almidones acetilados y propionizados para aplicaciones concretas. Entre ellas, la producción de almidones acetilados para uso como aditivo de alimentos; la obtención de almidones esterificados con ácidos grasos de cadena corta (AGCC) como fuente de almidón resistente (AR); y la preparación de películas de almidón en las que la incorporación de gránulos de almidón modificados pudieran modular las propiedades mecánicas y la permeabilidad al vapor de agua de los films.

2. Metodología

2.1. Esterificación organocatalítica

Para la acetilación de almidón se contactaron anhídrido acético (60 mL), ácido tartárico (7.4 g) y almidón de maíz (10 g, bs) en un matraz de vidrio de 100 mL equipado con un condensador de reflujo. La propionización de almidón se produjo en condiciones similares. Las reacciones se llevaron a cabo a 130 °C con agitación magnética continua y durante distintos tiempos de reacción. Al cumplirse el tiempo de reacción, el producto sólido se separó por filtración bajo vacío, se lavó reiteradamente con agua destilada, y se secó a 50 °C durante 12 h. El grado de sustitución (GS) fue determinado por saponificación heterogénea y titulación por retroceso con HCl.

2.2. Caracterización

Los espectros RMN CP/MAS ^{13}C del almidón nativo y acetilado (GS=0.40) fueron adquiridos en un equipo BrukerAdvance II-300 equipado con un cabezal de 4 mm. El equipo se operó a una frecuencia de 300.13 Mhz para protones y 75.46 Mhz para carbonos. Se utilizó glicina como referencia y para ajustar las condiciones de Hartmann-Hahn. Para el desacople heteronuclear se utilizó la secuencia SPINAL64. Todas las mediciones se realizaron a temperatura ambiente y la rotación del ángulo mágico fue de 10 kHz. Los espectros infrarrojos de las muestras de almidón fueron adquiridos en un espectrofotómetro IR Affinity-1 Shimadzu con Transformada de Fourier en modo de transmisión. A tal fin, se prepararon pastillas de almidón:KBr (1:100). Los espectros fueron adquiridos con 40 barridos de 4000 a 650 cm^{-1} y con una resolución de 4 cm^{-1} . Muestras secas de suspensiones de almidón/agua se metalizaron con oro y se observaron en un microscopio electrónico de barrido Zeiss Supra 40 con cañón de emisión de campo a 3kV. El análisis termogravimétrico de muestras de almidón (\approx 6 mg, bs) se llevó a cabo en un TGA-50 de Shimadzu, con un programa de temperatura de 25 a 650 °C a una velocidad de 10 °C/min, bajo atmósfera de nitrógeno (30 mL/min). Los difractogramas de rayos X de muestras secas se obtuvieron en un difractómetro Rigaku D/Max-C con goniómetro vertical en el rango de 2θ de 10 a 45° con un paso de 0.02°, radiación Cu/K α (0.154 nm), una intensidad de 30 mA y un voltaje de 40kV.

Los productos de reacción con GS < 0.1 se caracterizaron en términos de sus propiedades funcionales, tales como el poder de hinchamiento, solubilidad, claridad de la pasta, sinéresis y retrogradación.

Para la determinación de almidón resistente, muestras de almidón (100 mg, bs) se incubaron en un baño de agua con agitación con 4 mL de α -amilasa pancreática (conteniendo amiloglucosidasa, 3 U/mL) por 16 h a 37 °C. La reacción se terminó con etanol y el AR fue

recuperado por centrifugación (3000 rpm, 10 min). Los pellets se lavaron 2 veces con etanol 50%, seguidos de una centrifugación (3000 rpm, 10 min) y se secaron a 45 °C hasta peso constante.

Se prepararon películas de almidón mezclando almidón (3% p/p), agua (93.5 % p/p) y glicerol (1.5% p/p) en las que se incorporaron gránulos de almidón modificado (DS= 0.24, 0.40 y 0.97). Las películas obtenidas fueron evaluadas con ensayos mecánicos en modo tracción y permeabilidad al vapor de agua.

3. Resultados.

3.1. Caracterización básica

La caracterización básica se realizó respecto de los almidones acetilados. Como se puede observar en la Fig. 1 el estudio del tiempo de reacción permitió obtener almidones acetilados con valores de GS en el rango de 0.07 (0.5h) a 1.97 (6 h). De esta manera, se evidencia la potencialidad de esta ruta para obtener en forma sencilla, sin solventes agregados, a presión atmosférica y a temperaturas moderadas, almidones acetilados con el nivel de sustitución que la aplicación lo requiera.

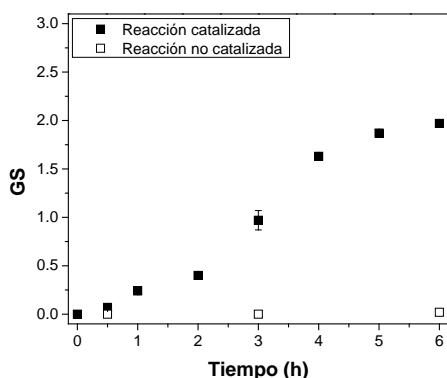


Figura 1. Acetilación de almidón con anhídrido acético catalizada por ácido L-(+)-tartárico.

En la Fig. 2 se presentan los espectros RMN de almidón de maíz nativo y acetilado con GS=0.40 (2h). El espectro del almidón nativo mostró 4 señales correspondientes a los carbonos del polisacárido (C1: 100 ppm, C4: 82 ppm, clúster C2-C3-C5: 65–80 ppm, y C6: 62 ppm). Tras la acetilación, aparecieron dos nuevas señales asignables a las resonancias de los carbonos de los grupos acetato formados en 170 ppm (C=O) y en 20 ppm (CH₃); confirmando que la reacción de acetilación del almidón efectivamente tuvo lugar.

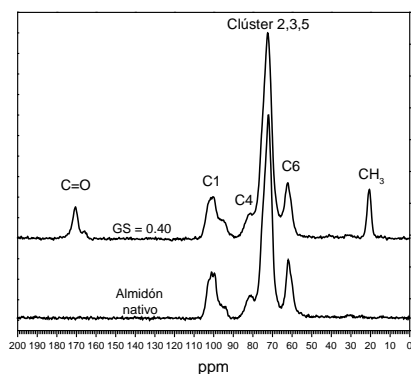


Figura 2. Espectros RMN CP/MAS ¹³C de almidón nativo y almidón acetilado GS=0.40.

Los espectros IR de almidones acetilados (Fig. 3) otorgaron evidencia cualitativa de la esterificación con la aparición de bandas características del grupo acetato centradas en 1748 cm^{-1} (estiramiento del grupo carbonilo C=O del éster), 1376 cm^{-1} (deformación del grupo C-H del CH₃ del acetato) y 1244 cm^{-1} (enlace C-O del grupo acetato)⁶. La intensidad de estas bandas se incrementó con la evolución del GS de los almidones. Por su parte, las bandas centradas en 3400 cm^{-1} (grupos OH del almidón), y en 1645 cm^{-1} (vibraciones por flexión de agua absorbida de la muestra), disminuyeron gradualmente con el GS, corroborando que los grupos hidroxilo fueron progresivamente reemplazados por grupos ésteres menos hidrofílicos.

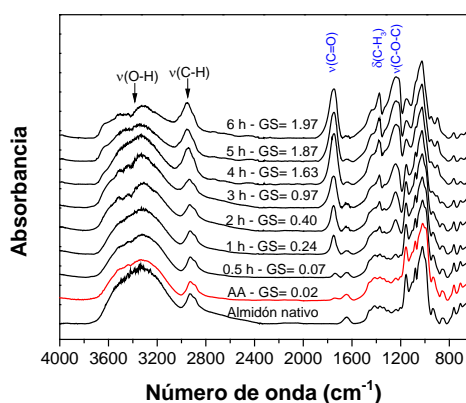


Figura 3. Espectros FTIR del almidón nativo y almidones acetilados.

Las micrografías de SEM (Fig. 4) evidenciaron que inicialmente las superficies lisas de los gránulos de almidón de maíz nativo se convirtieron en superficies más rugosas. Con el posterior incremento del GS aparecieron zonas deprimidas, y el inicio de la deformación y agrietamiento del gránulo atribuido a la introducción de grupos acetato (más voluminosos e hidrofóbicos). No se observó la pérdida de la estructura granular del almidón. Luego de un proceso de gelatinización del almidón se recuperaron gránulos con el interior hueco. Su caracterización básica dio cuenta de que la porción recuperada correspondía a la fracción acetilada del gránulo (resultados no mostrados). Las micrografías SEM de estos gránulos huecos microtomados mostraron que el espesor de la porción acetilada del gránulo se incrementó con el aumento del GS (Fig. 4B). Estos resultados evidencian que la reacción de acetilación procede desde la superficie del gránulo hacia el interior de éste.

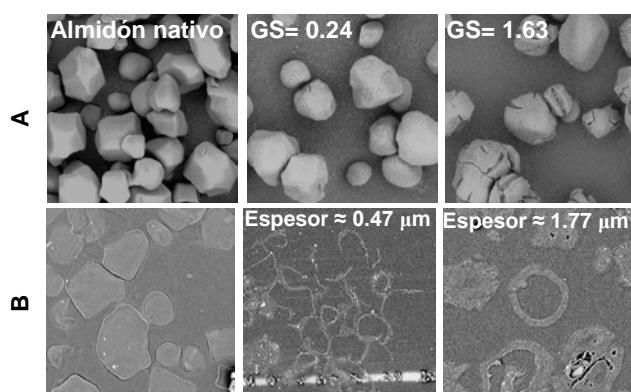


Figura 4. Micrografías de SEM para almidón nativo y almidones acetilados. A) Gránulos enteros, B) gránulos microtomados (porción acetilada).

Los difractogramas de rayos X de almidones acetilados con GS de hasta 1.23 presentados en la Fig. 5 fueron muy similares a los del almidón de maíz nativo. Sin embargo, la intensidad

de los picos cristalinos mostró una reducción gradual con el aumento del GS, indicando que la incorporación de los grupos acetato redujo progresivamente la cristalinidad de los almidones⁶.

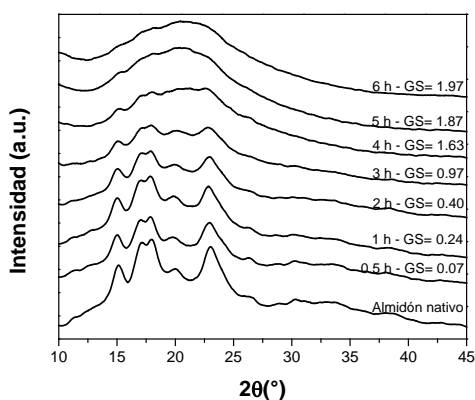


Figura 5. Difractogramas de rayos X del almidón nativo y almidones acetilados.

El análisis termogravimétrico se presenta en la Fig.6 en términos de la primera derivada de las señales TG (DTG) normalizado respecto de la masa inicial de la muestra. Los almidones acetilados obtenidos en el presente trabajo registraron tres etapas de pérdida de peso, que se tradujeron en tres picos en los datos de DTG. La primera etapa (25-140 °C) corresponde a la liberación de agua físicamente adsorbida. La comparación con la bibliografía reveló que los dos picos solapados siguientes corresponden a la condensación de grupos hidroxilo que permanecen en los almidones luego de la acetilación (Tmax: 305-331 °C); y a la liberación de ácido acético como producto de descomposición de los almidones acetilados (Tmax: 378-384 °C)⁷. Con el incremento del GS de las muestras, el área del pico de descomposición de grupos OH remanentes disminuyó en favor del incremento del área del pico de descomposición de grupos acetato, hasta observarse un único pico de descomposición; como consecuencia del menor número de grupos OH remanentes en el almidón. La estabilidad térmica de los almidones esterificados por la vía propuesta aumentó a medida que los grupos OH fueron reemplazados gradualmente por grupos acetato térmicamente estables.

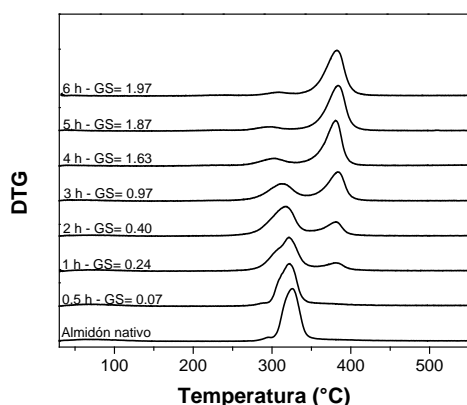


Figura 6. Curvas DTG para almidones nativo y acetilados.

3.2. Caracterización específica

Los almidones generalmente se modifican para ayudar a prevenir los cambios indeseables en la textura y apariencia del producto en aplicaciones de alimentos⁸. Las condiciones de reacción se modularon para obtener almidones modificados con un GS para uso en la industria alimentaria ($GS < 0.1$). En paralelo se evaluó la capacidad del ácido tartárico (α -hidroxiácido dicarboxílico) para entrecruzar el almidón de manera simultánea con la acetilación con el estudio de las propiedades funcionales del almidón acetilado obtenido en presencia de ácido tartárico (AA-T) respecto de un almidón acetilado obtenido sin el agregado del α -hidroxiácido al sistema de reacción (AA).

Parámetro	AN	AA	AA-T
Poder de hinchamiento (g/g) (55-95°C)	2.3 – 25.8	10.5 – 28.4	11.0 – 17.5
Solubilidad (%) (55-95 °C)	0.1 – 12.6	12.9 – 62.0	11.1 – 65.1
T_{gel} (°C)	71.3	65.0	65.7
T_o (°C)	64.9	53.6	59.9
ΔH_{gel} (J/g)	10.5	4.4	4.9
Claridad de la pasta (T%)	2.49	10.25	4.65
Sinéresis (%) a 4°C, 7° ciclo	32.00	1.89	12.05

Tabla 1. Propiedades funcionales de almidones nativos y modificados.

Teniendo en cuenta los requisitos de la aplicación de alimentos, ambos almidones modificados presentaron una mejora notable en las propiedades funcionales con respecto al almidón nativo (AN) tal como se muestra en Tabla 1. Los grupos éster afectaron las propiedades térmicas de gelatinización del almidón. La temperatura de gelatinización y la entalpía disminuyeron significativamente con la modificación, debido a la introducción de grupos acetilo que debilitan las fuerzas de unión intragranular e intergranular de la molécula de almidón. Por otro lado, y a pesar de sus valores de GS similares, los resultados mostraron que los almidones modificados presentaron diferencias significativas en sus propiedades funcionales. Ambos almidones modificados mostraron mejoras en el poder de hinchamiento, la solubilidad y la claridad de la pasta con respecto del AN. Estos resultados se atribuyen a la introducción de grupos acetilo que condujeron a una reorganización estructural debido al impedimento estérico y la repulsión entre las moléculas de almidón, facilitando así la filtración del agua. Sin embargo, los incrementos fueron más bajos para AA-T que para AA, lo que sugiere que la presencia de ácido tartárico en el sistema podría haber fortalecido la unión entre las cadenas de almidón, restringiendo el hinchamiento granular; y también podría haber alterado la transmitancia de la luz en la pasta al reflejarla, dando como resultado un valor T% más bajo. Los valores de sinéresis de almidones modificados fueron más bajos que los del AN debido a la estabilización por grupos sustituyentes que dificultan la retrogradación. Sin embargo, AA-T mostró una menor estabilidad frente al almacenamiento en frío que se asocia con una movilidad reducida de las cadenas de almidón. En general, la comparación de las propiedades funcionales de AA y AA-T sugiere que el ácido L-tartárico fue eficaz para inducir el entrecruzamiento del almidón. Una ventaja de la nueva metodología propuesta en este documento es que la modificación dual (es decir, la acetilación y el entrecruzamiento) se produjo en un solo paso, a diferencia de las metodologías convencionales en las que ambos procesos se llevan a cabo uno después del otro.

El almidón resistente (AR) es la porción de almidón que no puede ser hidrolizada por las enzimas digestivas en el intestino delgado y alcanza el intestino grueso de individuos saludables⁹. Ahí, el AR es fermentado por la microflora local produciendo ácidos grasos de

cadena corta (AGCC), predominantemente acetatos, propionatos y butiratos. Estos AGCCs son reconocidos por sus propiedades benéficas sobre el colon humano. El almidón químicamente modificado es un tipo de almidón resistente (AR4) que escapa de la digestión debido a la presencia de enlaces atípicos que impiden el acceso de las enzimas digestivas. Actualmente existe un creciente interés en producir AR4 mediante la esterificación de almidón, específicamente la acetilación, propionización y butirilización; debido a su capacidad de llegar al colon y suministrar el AGCC específico. En la contribución actual se produjo almidón propionizado con la metodología propuesta con distintos GS variando los tiempos de reacción entre 1 y 5 h; y a fines de estudiar el efecto de la estructura inicial del almidón sobre el contenido de AR en los ésteres obtenidos se usó como sustrato tanto almidón de maíz nativo granular (estructura semicristalina tipo A); y almidón de maíz pregelatinizado (estructura amorfa). Como se muestra en la Fig. 7, para ambos almidones de maíz el aumento en el tiempo de reacción entre 1 y 5 h conllevó a un incremento continuo en el nivel de derivatización logrado, alcanzando en 5 h valores de GS de 0.46 y 0.69 para el almidón de maíz nativo y pregelatinizado, respectivamente.

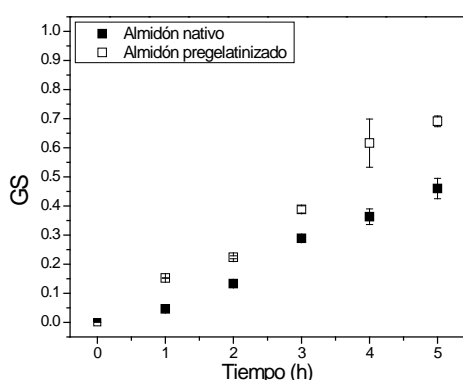


Figura 7. Efecto del tiempo de reacción en la propionización organocatalítica de almidón de maíz (nativo y pregelatinizado) 130 °C.

El contenido de almidón resistente de las muestras de almidón de maíz propionizado con diferentes GS y con diversa estructura cristalina se muestra en la Fig. 8. Los resultados mostraron la idoneidad de la ruta para producir AR4 con contenidos de almidón resistente que se incrementaron con el aumento del GS. Los datos también indicaron que el nivel de sustitución alcanzado fue el factor clave que condicionó la resistencia de los almidones derivatizados, independientemente de la estructura del almidón esterificado.

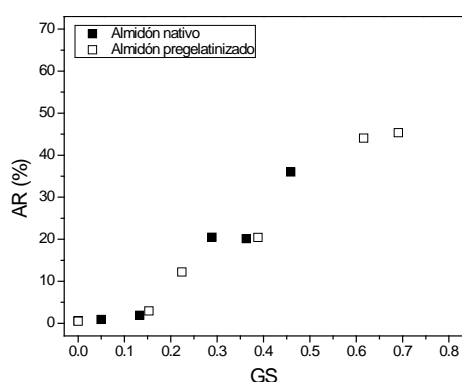


Figura 8. Contenido de almidón resistente (AR) de almidones propionizados en función de su grado de sustitución (GS).

Finalmente, la incorporación de gránulos de almidón esterificado como carga en películas de almidón condujo a obtener películas biodegradables con propiedades mecánicas

mejoradas al incrementar el módulo de Young y ligeras mejoras en la permeabilidad al vapor de agua respecto de la matriz sola.

4. Conclusiones

Se propuso la esterificación del almidón mediante una novedosa metodología organocatalítica caracterizada por el uso de un α -hidroxiácido de origen natural como catalizador y por la operación en ausencia de solventes. Se pudo observar que controlando adecuadamente las condiciones de reacción, la metodología propuesta demostró su idoneidad para producir almidones esterificados en todo el rango de GS posible. Se comprobó que la reacción de acetilación procede desde la superficie del gránulo hacia el interior. Los estudios específicos realizados permitieron comprobar que la ruta propuesta es capaz de producir almidones acetilados con propiedades deseables para la industria alimentaria; almidones modificados con AGCC con alto contenido de AR, el cual se incrementó con el nivel de modificación logrado; y películas de almidón cargadas con los almidones modificados que presentaron mayor módulo y una mejora en la propiedad de barrera al agua.

5. Referencias:

- [1] B. Kaur, F. Ariffin, R. Bhat, A.A. Karim, *Food Hydrocolloid*.26 (2012), 398–404.
- [2] V.P. Cyras, M.C. Tolosa Zenklusen, A. Vazquez, *J. Appl. Polym. Sci.* 101 (2006), 4313–4319.
- [3] R. Shogren, *Carbohydr. Polym.*72 (2008), 439-443.
- [4] E. Pérez Romagnoli. *MundoAgrario* 9, (2009).
- [5] J. Hafrén, A. Córdova, *Macromol. Rapid Commun.* 26 (2005), 82-86.
- [6] A. López-Rubio, J.M. Clarke, B. Scherer, D. Topping, *Food Hydrocolloid*.23 (2009), 1940-1946.
- [7] M. Elomaa, T. Asplund, P. Soininen, et al., *Carbohydr. Polym.*57 (2004), 261–267.
- [8] Miyazaki M. et al., *Trends Food Sci. Tech.* 17, (2006), 591-599.
- [9] D.L. Topping, P.M. Clifton. *Physiol. Rev.*, 81 (2001), 1031-1064.

25

Blindaje de ondas electromagnéticas en materiales no convencionales

Silvina Boggi¹ y Walter G. Fano²

¹ Departamento de Matemática. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

² Departamento de Electrónica. Facultad de ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

Resumen

La propagación de ondas electromagnéticas en medios dispersivos presenta interés tecnológico en la actualidad en diferentes campos de las ciencias e ingenierías.

En este trabajo se ha estudiado la eficiencia de blindaje de un metamaterial, un material artificial estructurado y periódico cuyas propiedades electromagnéticas no dependen de los átomos que forman sus materiales, sino de cómo responden al campo electromagnético los "meta-átomos" que lo forman. Los metamateriales pueden ser representados como un material dispersivo homogéneo que tiene parámetros constitutivos eficaces que dependen del diseño de la estructura que lo conforma y presentan novedosas características inexistentes en la naturaleza. Las aplicaciones de metamateriales son diversas, entre ellas el diseño de antenas, construcción de absorbedores de alta eficiencia, superlentes para mejorar microscopios, y diseño de estructuras para enmascarar o invisibilizar campos eléctricos y magnéticos, entre otros.

Se ha fabricado un metamaterial con 4 filas de 5 varillas de bronce cada una ubicados entre dos placas dieléctricas y se realizaron mediciones de la eficiencia de blindaje en los mismos al ser sometidos a una onda electromagnética plana, con el campo eléctrico polarizado a lo largo de la dirección de los cilindros conductores y también con el campo eléctrico polarizado perpendicular a los mismos. Se observaron valores importantes de eficiencia del blindaje con la primera polarización y nulos en la segunda.

Propagación electromagnética

En la segunda mitad del siglo XIX, el físico escocés James Clerk Maxwell concebía a la luz como ondulaciones. Las ondas son perturbaciones que se propagan, no transportan materia, transportan energía [1]. Al lanzar una piedra al agua, se origina una onda que avanza hacia la orilla, pero las partículas del agua no "viajan", suben y bajan en la misma posición.

Una onda electromagnética es la forma de propagación de la energía electromagnética, no requiere necesariamente de un medio material para propagarse, dado que es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que en el vacío se propaga a la velocidad de la luz $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ [1], [2].

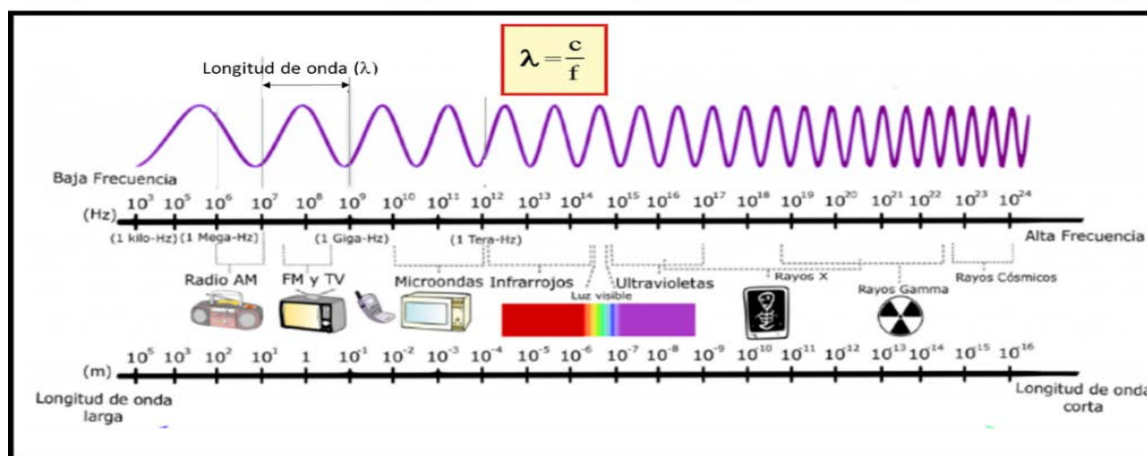


Figura 1. Espectro electromagnético

Las ondas electromagnéticas se presentan de modos diversos. Son ondas electromagnéticas las ondas de radio y de televisión que sirven para transmitir información utilizando antenas, son ondas electromagnéticas las que se concentran dentro de un horno de microondas, son ondas electromagnéticas la radiación infrarroja que sentimos como calor, la luz visible que detectamos con nuestros ojos y también, entre otras, son ondas electromagnéticas los rayos X que se utilizan en la toma de radiografías en caso de una fractura. La diferencia entre ellas reside en una característica muy importante de las ondas electromagnéticas que es su frecuencia de oscilación. En la figura 1 se muestra, esquemáticamente, el espectro electromagnético en términos de los valores correspondientes a la frecuencia y longitud de onda.

Propagación en medios dispersivos

Al incidir una onda electromagnética en un medio material, el medio responde a la radiación de distinta forma según la frecuencia de la onda que viaja en él, estos medios se llaman "medios dispersivos". La propagación electromagnética en medios dispersivos presenta interés tecnológico en la actualidad en diferentes campos de las ciencias e ingenierías. Estos materiales son muy utilizados para para diseñar dispositivos electrónicos tales como transformadores, antenas, absorbedores y blindajes de ondas electromagnéticas, etc. [3], [4].

En general, a los materiales que forman los medios se los caracteriza como medios dieléctricos o aisladores, medios magnéticos y medios conductores, dependiendo del fenómeno que predomina cuando son sometidos a la acción de los campos electromagnéticos.

En el caso de los materiales dieléctricos sus átomos y sus moléculas, no permiten que las cargas se puedan mover libremente en la estructura del material. Si bien no hay desplazamiento de cargas, la acción del campo eléctrico modifica ligeramente las órbitas y los centros de masa de los átomos y moléculas, obteniéndose un efecto de polarización eléctrica, mediante la aparición de dipolos eléctricos dentro del material, un esquema de los dipolos eléctricos se puede observar en la Figura (2).

A este efecto se lo denomina polarización eléctrica, que da lugar a la densidad de corriente de desplazamiento en el medio dieléctrico. Expresando la polarización del medio: $\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E}$. Siendo \mathbf{P} : vector polarización, \mathbf{E} vector campo eléctrico aplicado, ϵ_0 constante dieléctrica y χ_e susceptibilidad eléctrica del medio.

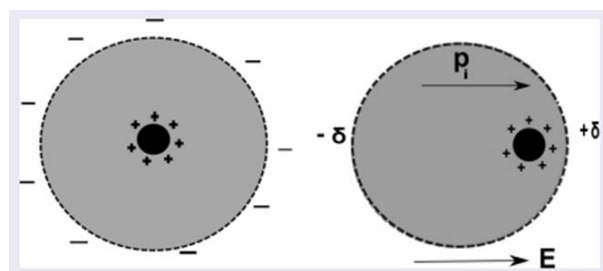


Figura 2. Polarización dieléctrica

El vector desplazamiento eléctrico (\mathbf{D}):

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \text{ reemplazando: } \mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E}, \text{ por lo que resulta: } \mathbf{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \mathbf{E} = \epsilon \mathbf{E}$$

Definiendo de esta forma la permitividad eléctrica ϵ , concepto clave que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio [5].

Un efecto similar se produce en un medio magnético que se encuentra sometido a un campo magnético, dando lugar a la orientación de los dipolos magnéticos dentro del material, produciéndose así una polarización, llamada polarización magnética, como se puede observar en la Figura (3).

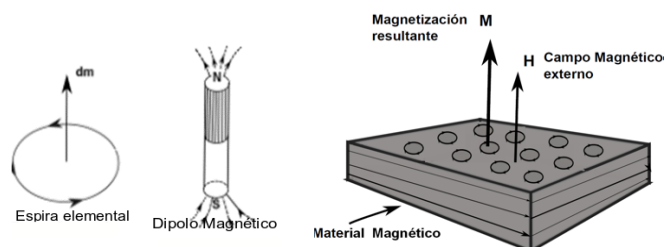


Figura 3. Polarización magnética

La polarización magnética da lugar al vector Densidad de flujo Magnético (\mathbf{B}): Dado que la magnetización de un material magnético es proporcional al campo magnético aplicado: $\mathbf{M} = \chi_M \mathbf{H}$, χ_M : susceptibilidad magnética.

$$\text{Siendo: } \mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \chi_M \mathbf{H}) = \mu_0 (1 + \chi_M) \mathbf{H}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}.$$

Definiéndose de esta forma la permeabilidad magnética (μ), que describe como un campo magnético es afectado y afecta a un medio [6], [7].

Metamateriales

Los metamateriales son medios artificiales con propiedades electromagnéticas inusuales que no se encuentran en forma espontánea en la naturaleza. Este gran descubrimiento científico está suponiendo el desarrollo de nuevos dispositivos en los campos de la óptica y las telecomunicaciones, tanto a nivel micrométrico como a nivel nanométrico.

El concepto físico de Metamaterial fue desarrollado por Viktor Veselago quien en 1968 especuló con la posibilidad de crear materiales con permitividad eléctrica y permeabilidad magnética simultáneamente negativos, lo que conduciría a un índice de refracción negativo. Según el científico, el comportamiento que tendría la radiación al atravesar ese material sería muy diferente a todo lo conocido [8].

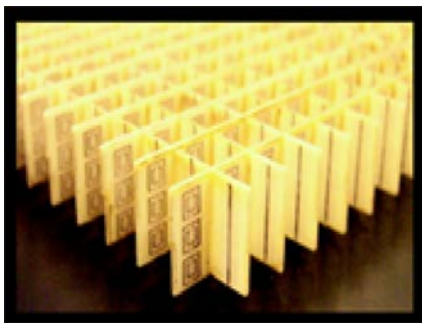


Figura 4. Metamaterial

Los metamateriales son estructuras artificiales que consisten en repeticiones periódicas de un patrón formado por metales y dieléctricos (celda unidad) cuyas propiedades electromagnéticas se pueden controlar dado que dependen del diseño de la estructura.

Siendo la longitud de onda de la radiación mucho mayor que la longitud de la celda unidad, esta radiación no alcanza a detectar la estructura interna [9].

Foto: Houck, Andrew A.; Brock, Jeffrey B.; Chuang, Isaac L.(2003)

Así, la diferencia esencial entre los materiales y los metamateriales es que, en el primer caso, sus propiedades dependen de su composición, es decir, de los átomos y moléculas que los forman. En cambio, las propiedades de los metamateriales –propiedades que no se encuentran en la naturaleza– dependen más de su estructura que de su composición. En este tipo de medios se definen la permitividad eléctrica efectiva (ϵ_{eff}) y permeabilidad magnética efectiva (μ_{eff}) haciendo referencia a las propiedades electromagnéticas del medio considerado como un conjunto.

En la Figura (5) se muestra una clasificación de los medios en función del signo de la permitividad y de la permeabilidad. El primer cuadrante corresponde a los medio $\epsilon > 0$, $\mu > 0$, entre los que se encuentran la mayor parte de los materiales convencionales. El segundo y cuarto cuadrante corresponde a materiales con uno de los dos parámetros positivo y el otro negativo, lo que supone que la intensidad de los campos se atenúa al ingresar en el material.

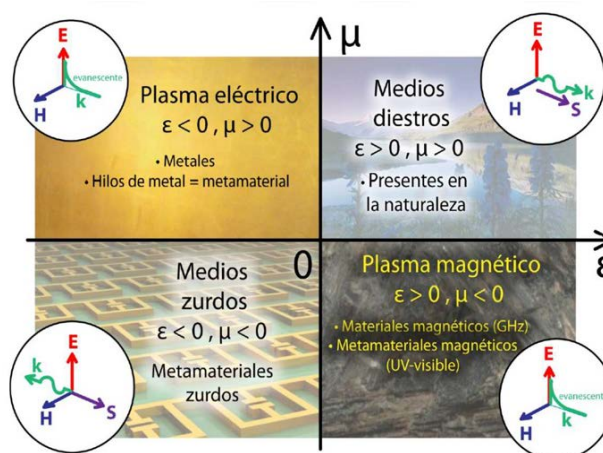


Figura 5. Clasificación de los medios

Dibujo: A. Martínez, Metamateriales fotónicos, Nanofotónica Universidad Politécnica de Valencia,

2017,

El tercer cuadrante corresponde a los materiales con ambos parámetros positivos en el mismo rango de frecuencia lo que indica índice de refracción negativo, son los metamateriales LHM (Left- Handed Materials) que no están presentes en la naturaleza.

En la búsqueda de estos metamateriales con permitividad y permeabilidad negativa, en 1996 Sir John Pendry propuso construir un material conformado por alambres metálicos muy delgados, de manera que “visto desde lejos”, se ve como un material homogéneo que tenía $\epsilon < 0$ en el rango de los GHz ($1 \cdot 10^9$ Hz). Llegados a este punto, Pendry y colaboradores continuaron investigando para encontrar estructuras con permeabilidad negativa en el mismo rango de frecuencias y así fue como en 1999 presentaron una configuración conocida como “Split rings” que consistía en cilindros metálicos con anillos concéntricos que presentaba permeabilidad negativa también en el rango de las microondas [9], [10].

De esta forma, a finales de los 90 ya se disponía de lo necesario para posibilitar los metamateriales LHM. Smith y colaboradores en el año 2000 presentan un metamaterial estructurado que muestra una banda de frecuencia donde el índice de refracción efectivo (n) es negativo. El material consiste en un conjunto bidimensional de celdas unitarias repetidas de tiras de cobre y resonadores de anillo dividido. De esta forma Smith concluye:

“Ahora es posible realizar configuraciones de diseños ópticos geométricos que no se podrían realizar con materiales de índice de refracción positivo”.

El comportamiento que tendría la radiación al atravesar ese material sería muy diferente a todo lo conocido. De hecho, si el agua tuviera índice de refracción negativo, en la simulación de la figura (6) la varilla sumergida en agua parecería doblarse hacia “el otro lado”. Este conduce al principio de la “invisibilidad”.

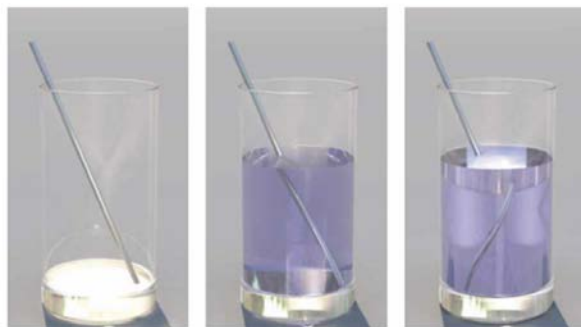


Figura 6. Refracción negativa

En principio, para que un metamaterial funcione como tal, es decir, que afecte a la luz incidente y tenga refracción negativa, es necesario que los elementos que conforman su estructura interna sean de un tamaño menor al de la longitud de onda de la luz utilizada, este es por ahora una limitación tecnológica importante. En la actualidad, el diseño de estas estructuras es llevado a cabo mediante el modelado computacional, que predice el funcionamiento que tendrá el metamaterial a fabricar [11], [12].

Foto: Gunnar Dolling, Martin Wegener, Stefan Linden, and Christoph Hormann, Opt. Express, 14, 1842-1849 (2006)

Modelo de Metamaterial con permitividad eléctrica efectiva negativa

Se ha simulado la permitividad eléctrica efectiva de un metamaterial que consiste en varillas conductoras situadas entre dos planos dieléctricos como se ve en la figura (7) y se aplica una onda electromagnética plana polarizada linealmente en el eje z coincidente con los cilindros conductores que se propaga dentro del material y presenta una permitividad eléctrica efectiva que toma valores negativos en frecuencia de microondas. La permitividad del material en función de la frecuencia de la onda resulta:

$$\varepsilon_{eff}(\omega) = 1 + \frac{1}{\varepsilon_0 j \omega a^2 (j \omega L + Z_{int})}, \quad L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{a^2}{4r_0(a-r_0)}\right) \quad (1)$$

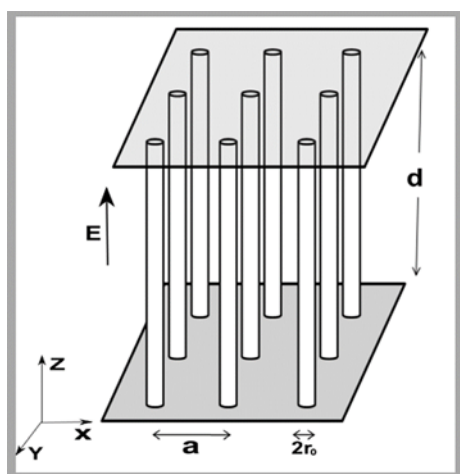


Figura 7. Modelo de Metamaterial

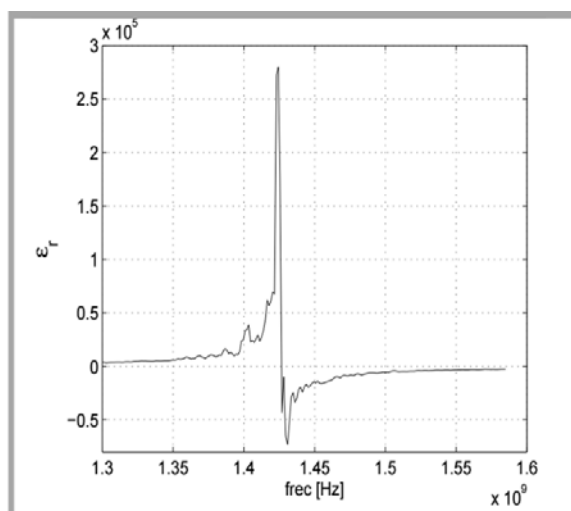


Figura 8. Simulación de la permitividad efectiva del MTM

Siendo: a y r_0 las dimensiones en la celda unidad, Z_{int} la impedancia interna y L la inductancia del material. Se realizó una simulación de la permitividad efectiva del metamaterial en función de la frecuencia aplicando el modelo de la ecuación (1), como se puede observar en el gráfico de la figura (8) [13], [14].

Blindaje de ondas electromagnéticas en el metamaterial

Un blindaje es, conceptualmente, una barrera a la transmisión de los campos electromagnéticos. Los blindajes se eligen por sus propiedades físicas (resistencia a la temperatura, resistencia a la intemperie, etc.) y por su permitividad eléctrica y permeabilidad magnética.

Una onda electromagnética plana incide sobre un material, como se observa en la figura (9), una parte de la onda incidente se refleja, y otra parte de esta onda incidente se transmite a través del material [15]. Se calcula la eficiencia de un blindaje como la relación de la magnitud del campo eléctrico incidente en el material respecto a la magnitud del campo eléctrico que se transmite a través del mismo:

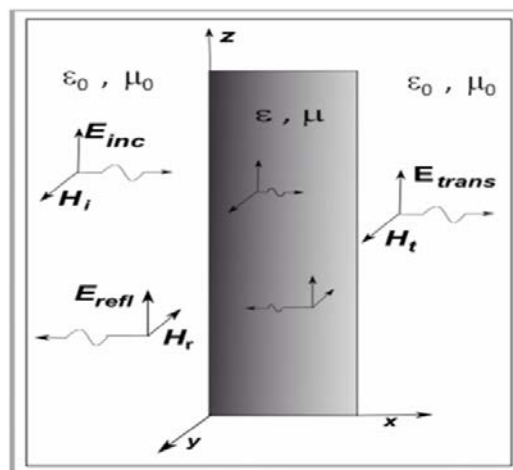


Figura 9. Eficiencia de blindaje

$$SE_{DB} = 20 \log \left| \frac{E_{inc}}{E_{trans}} \right|.$$

Procedimiento experimental

Se ha construido un metamaterial similar al del modelo, formado por un conjunto de 4 filas de 5 cilindros de bronce cada una, ubicados entre dos planos dieléctricos perpendiculares a los conductores, ver foto en la figura (10).

El banco de pruebas se muestra en la figura (11), compuesto por dos antenas periódicas LOG, para rango de frecuencia: 800-3899 MHz, conectadas a un analizador de red vectorial Agilent Field Fox N9932A



Figura 10. Metamaterial

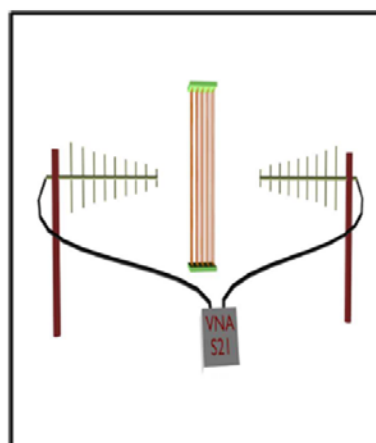


Figura 11. Banco de medición

El cálculo de la eficiencia del metamaterial consiste en someter al material a una onda electromagnética plana y medir la respuesta del mismo. Se miden los coeficientes S_{21} , coeficientes de transmisión directa de la matriz de dispersión para un cuadripolo (en

decibeles) que evalúa la relación de potencia recibida en la antena receptora con respecto a la enviada por la antena transmisora con y sin el metamaterial. La diferencia entre los coeficientes S21 da como resultado la eficiencia de blindaje. Es muy importante en estas mediciones la calibración previa del analizador de redes para una medición confiable [16]. La figura (12) muestra la efectividad del blindaje para el metamaterial bajo prueba, con la aplicación de una onda plana electromagnética con campo eléctrico polarizado. Como se esperaba, la efectividad del blindaje aumenta, llegando a 20 DB, lo que significa una atenuación del campo eléctrico, siendo la intensidad del campo transmitido diez veces menor que la intensidad del campo incidente en el material. Esta atenuación se produce en frecuencias cercanas a 1.4 GHz, que es consistente con el gráfico en la figura (8), ya que se observan valores de permitividad negativos alrededor de esas frecuencias.

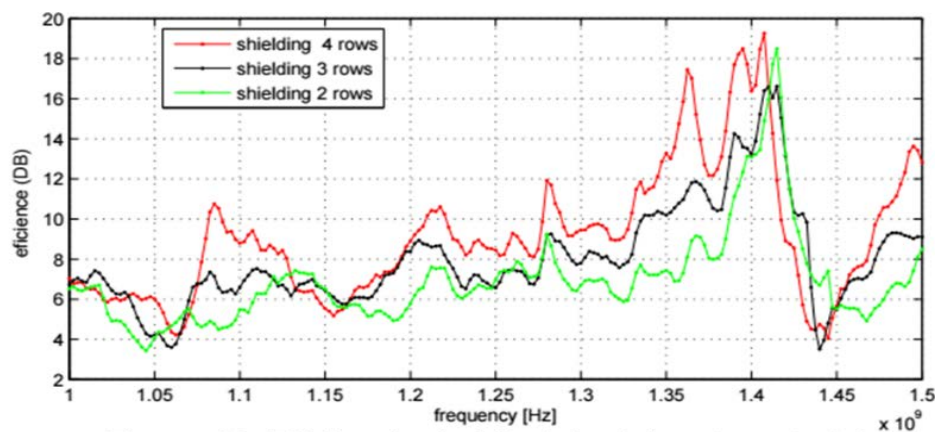


Figura 12. Eficiencia de blindaje del metamaterial

Referencias:

- [1] J. Clerk Maxwell. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field . Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1865 155, 459-512, published 1 January 1865.
- [2] C. A. Balanis, Advanced Electromagnetic Engineering, Arizona, USA: J.Wiley, (1950).
- [3] V. Trainotti y W. G. Fano, Ingeniería Electromagnética, 1 ed. Buenos Aires. Argentina: Ed. Nueva Librería, (2005).
- [4] L. D. Landau and E. M. Lifchitz, Electrodynamics of continuous Media. Addison Wesley, 1981.
- [5] A. Von Hippel, Dielectrics and Waves, 1st ed. New York, USA: John Wiley and Sons Inc.,1959.
- [6] E.P. Wohlfarth, Ferromagnetic Materials, North Holland, V 2- p256. (1986).
- [7] W. G. Fano, S. Boggi and A. C. Razzitte, Causality study and numerical response of the magnetic permeability as a function of the frequency of ferrites using Kramers Kronig relations, 2nd ed. Physica B 403 (2008).
- [8] V.G. Veselego, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ , Soviet Physics UsPekhi 538.30, Volume 10, Number 4 january- february 1968.
- [9] J.B. Pendry, A.J. Holden, W.J. Stewart, and I. Youngs, Phys. Rev. Lett. 76, (1996).
- [10] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol 47, No. 11, November 1999.
- [11] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction", Science 296, 77-79, 2001
- [12] Gabriel Stekolschik, Los metamateriales Luz obediente, revista Exactamente (2011).

- [13] S. Boggi, R. Alonso, and W. G. Fano, Shielding effectiveness of a metamaterial measured at microwave range of frequency, known as Wire Screen Metamaterial (WSM). Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 63, 33-46, 2018.
- [14] S. Boggi, A. Kieselesky, W.G.Fano “ A model for the effective dielectric permittivity of Metamaterials“ Proceedings of RPIC-IEEE 2015 Symposium, in print October 2015.
- [15] G. Lovat, P. Burghiognoli, and S. Celozzi, “Shielding properties of a wire medium screen,” IEEE Trans. on EMC, vol. 30, pp. 1–50, Febrero 2008.2005.
- [16] V.Trainotti, W. G.Fano, and L. Dorado, Ingenier´ia Electromagn´etica, Tomo 2. Argentina: Editorial Nueva Libreria, 2005.

26

Análisis de hormigón estructural mediante modelos de bielas y tensores no lineales

Vaquero Sebastián F. y Bertero Raul D.

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

Resumen extendido

Para conducir la carga hacia los apoyos se producen esfuerzos internos en las estructuras a los cuales denominamos solicitaciones. A su vez los esfuerzos internos sobre una sección transversal plana de un elemento estructural se definen como un conjunto de fuerzas y momentos estáticamente equivalentes a la distribución de tensiones internas sobre el área de esa sección. Las relaciones entre estos esfuerzos y las deformaciones/tensiones es un tema ampliamente tratado en la rama de la mecánica del sólido. Sin embargo la distribución lineal de deformaciones y tensiones en las cuales se basan estas relaciones sólo puede ser asumida para unas pocas regiones, para todas las demás la obtención de las deformaciones y tensiones difiere significativamente de la teoría clásica.

Para entender este concepto es útil distinguir a los elementos estructurales de hormigón armado en dos regiones:

- **Regiones “B”:** donde aplica la teoría clásica de vigas de Bernoulli-Navier.
- **Regiones “D”:** ubicadas en zonas adyacentes a discontinuidades geométricas (elementos que presentan pases, conexiones entre vigas y columnas, nudos de pórtico y/o cambios de rigideces abruptos) o discontinuidades de carga (zonas con cargas puntuales o reacciones). Estas discontinuidades originan disturbios en el flujo de tensiones interrumpiendo la distribución lineal de tensiones asociada a la teoría clásica de flexión.

La Figura 1 muestra la diferencia entre regiones “B” y “D” en un número de elementos estructurales.

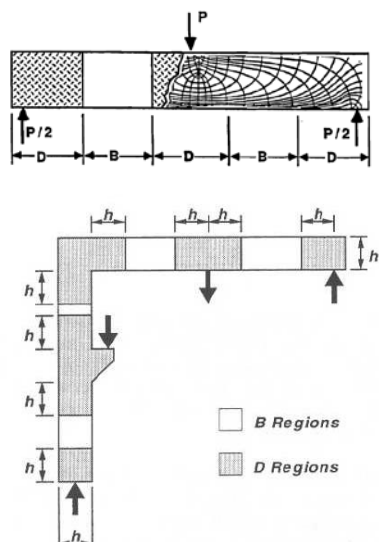


Figura 1. Diferencias entre regiones “B” y “D”.

El principio de Saint Venant enumera que las tensiones debidas a dos cargas estáticamente equivalentes aplicadas en un área pequeña son significativamente distintas solamente en la vecindad de dicha área de aplicación. A distancias mayores, en comparación con las dimensiones lineales de la superficie de aplicación, el efecto debido a estas dos cargas es el equivalente, ver Figura 2.

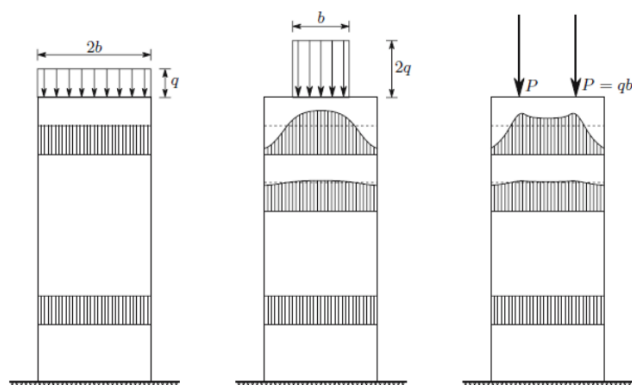


Figura 2. Principio de Saint Venant

Esto sugiere que el efecto localizado del disturbio termina aproximadamente a una distancia igual a una vez la altura del miembro estructural a cada lado del punto de la discontinuidad. Si bien el hormigón fisurado tiene distintas rigideces para cada dirección analizada, lo cual afecta directamente en la longitud de influencia de la discontinuidad, el principio de Saint Venant sirve como una ayuda conceptual y cuantitativa para demarcar las regiones “D”.

Previo a la aparición de la fisuración existe un campo de tensiones elástico el cual puede ser cuantificado con un análisis lineal (por ejemplo, mediante el método de los elementos finitos). Una vez fisurado se interrumpe el flujo de tensiones causando una redistribución de los esfuerzos internos, los cuales pueden ser idealizados mediante un reticulado en donde las bielas representan al hormigón trabajando a la compresión y los tensores a la armadura trabajando a la tracción. De esta forma las bielas y los tensores condensan el campo real de tensiones concentrando su curvatura en los nodos (al ser elementos unidimensionales sólo pueden deformarse en la dirección su eje). Por otro lado, las intersecciones entre las bielas y tensores son denominadas nodos y son conceptualizados como articulaciones.

Si bien la analogía del reticulado introducida por Ritter y Mörsch para el cálculo del refuerzo de corte en elementos estructurales de hormigón armado es la utilización más antigua y reconocida de este método, el mismo no se limita únicamente a esta única aplicación ya que tiene la particularidad de ser una metodología de diseño general aplicable tanto a las regiones “D” como así también para las regiones “B”.

El diseño de estructuras de hormigón armado mediante el método de las bielas y tensores pertenece al campo de aplicación del análisis límite o diseño plástico, más específicamente al teorema del límite inferior de la plasticidad también conocido como teorema estático. El mismo afirma que si es posible encontrar una distribución cualquiera de tensiones que satisfaga el equilibrio interno y que esté en equilibrio ante una determinada combinación de cargas externas, la estructura no colapsará o estará justo por debajo de su carga de colapso. La demostración se puede encontrar en la bibliografía, así como la verificación de su aplicabilidad para estructuras de hormigón.

Ya que el hormigón sólo permite deformaciones plásticas limitadas, el sistema estructural interno (en este caso representado por bielas, tensores y nodos) debe ser seleccionado de manera de no exceder la carga o deformación límite en ningún punto antes de que estado tensional asumido sea alcanzado en el resto de la estructura. En otras palabras, la estructura deberá tener suficiente ductilidad para poder hacer la transición entre su comportamiento elástico y su redistribución plástica de esfuerzos internos.

Debido a que la utilización del teorema del límite inferior de la plasticidad no nos asegura el cumplimiento de la compatibilidad cinemática, si el esquema de bielas y tensores seleccionado se aparta significativamente de la distribución interna de tensiones real esto puede producir deformaciones plásticas y en el caso particular del hormigón armado una fisuración excesiva.

El hecho de contar con las direcciones principales de tensión, por ejemplo mediante la utilización del método de elementos finitos en el rango elástico, facilita notablemente el armado del reticulado equivalente ya que se pueden orientar las bielas y tensores en las direcciones principales de compresión y tracción respectivamente. Como ventaja adicional, esta metodología nos asegura el cumplimiento del requerimiento de ductilidad y nos aproxima al cumplimiento de la compatibilidad de deformaciones.

En la bibliografía de referencia se describen otras metodologías utilizadas comúnmente para el armado del reticulado equivalente. Si bien el método tiene un indudable valor pedagógico la no singularidad de la solución crea una cierta sensación de fastidio en los estructuralistas que, esperando una herramienta de cálculo directo, se encuentran con un amplio rango de posibilidades y libertades que no conducen a una única solución.

Al seleccionar el modelo generalmente aparecen dudas sobre si se ha optado por el modelo correcto. En este sentido es beneficioso recordar el principio de Castigliano: la energía de deformación encuentra su mínimo en la configuración de equilibrio. O en palabras más simples: las estructuras siempre tienden a utilizar el camino de las fuerzas con menores esfuerzos y deformaciones. En nuestro caso, dado que los tensores son mucho más deformables que las bielas comprimidas, como regla general se opta por el modelo que tenga menor longitud de tensores.

También existen procesos relativamente simples para automatizar la definición de los modelos de bielas y tensores utilizando el método de los elementos finitos, inclusive utilizando programas comerciales. El método de la optimización estructural evolutiva [10] consiste en la realización de un análisis elástico lineal de la estructura original para localizar las partes redundantes o poco cargadas de la estructura las cuales se van removiendo de

manera iterativa y gradual para ayudar a identificar la topología de bielas y tensores. Para evitar redefinir la malla en vez de remover los elementos poco cargados se opta por darles una rigidez despreciable. Como criterio para la eliminación de elementos se puede utilizar la tensión media de Von Misses presente en el elemento (σ^{VM}) a la cual se la compara con la tensión de Von Misses máxima de la estructura (σ_{max}^{VM}). Si σ^{VM} es menor que un determinado porcentaje de σ_{max}^{VM} , denominado rr , ese elemento es removido. Ver *Figura 3* a modo de ejemplo de cómo funciona el procedimiento.

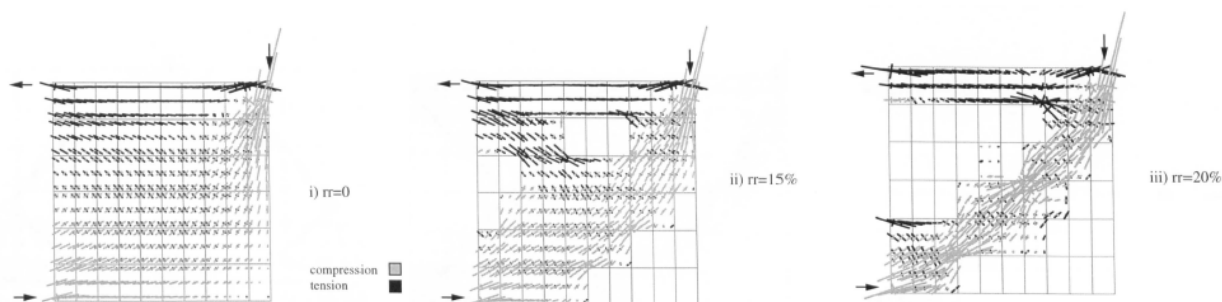


Figura 3 - Optimización estructural evolutiva de una ménsula

Inclusive existen procedimientos análogos que reemplazan la estructura con un reticulado de geometría relativamente compleja el cual es obtenido a partir de interconectar todos los nodos entre sí. La corrección de la rigidez en este caso se logra modificando la sección transversal del elemento en función del esfuerzo axial presente en cada elemento, la resistencia/módulo de elasticidad del elemento y un coeficiente que depende del ángulo deseado para las armaduras. Ver *Figura 4* a modo de ejemplo de cómo funciona el procedimiento.

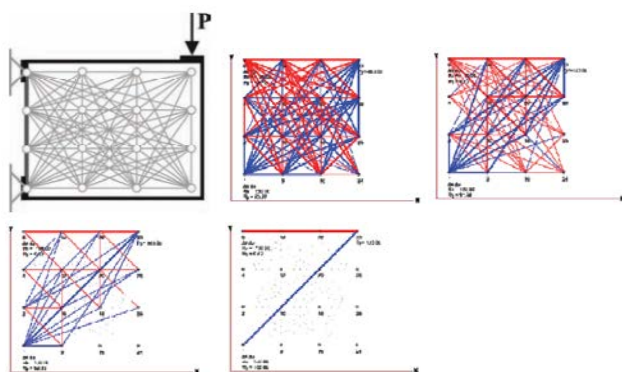


Figura 4 - Optimización estructural evolutiva de una ménsula (1, 5, 15 y 26 iteración)

El foco de este trabajo estará puesto en utilizar el poder de cálculo de las PC's actuales para desarrollar un algoritmo de código libre (MATLAB), que sea capaz de predecir el comportamiento de cualquier tipo de estructura de hormigón bajo carga monotónica o dinámica mediante el método de bielas y tensores (con todas las no linealidades del caso). Como el método de las bielas y tensores se adapta fácilmente a geometrías y/o cargas totalmente arbitrarias su principal ventaja es su generalidad. El objetivo final es brindarle al diseñador un método interactivo que le permita comprender la influencia de sus decisiones de diseño en el comportamiento real de la estructura.