

Capítulo 34

Una propuesta académica a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes

Rodríguez-Millán, Jesús*

Coordinador de la División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería,
Universidad de Los Andes, Mérida, Mérida, Venezuela.

*jrmillan@ula.ve

Resumen

Como consecuencia de la política educativa del estado venezolano las universidades autónomas del país se encuentran en la peor crisis académica e institucional que hayan conocido en su historia. La fuga de profesores, la desactualización de las bibliotecas, la obsolescencia de los laboratorios y últimamente la deserción estudiantil son sólo algunas manifestaciones de esta crisis. En medio de este panorama desolador la Universidad, la casa que vence la sombra, debe repensarse y hacer uso de todos los recursos a su alcance para mantenerse al día y en sintonía con las corrientes mundiales del conocimiento. En este trabajo se le hace una propuesta académica a la Facultad de Ingeniería de la ULA para utilizar armoniosamente todos sus recursos de pre y postgrado, así como también los recursos académicos de la Universidad en general, con la finalidad de mantener su competitividad y su capacidad para poder reaccionar rápida y eficientemente a las demandas académicas presentes y futuras del país y de la sociedad en su conjunto. Esta propuesta prevé: (i) extender la estructura flexible, hecha a la medida, del Doctorado en Ciencias Aplicadas de la Facultad de Ingeniería a los niveles de maestría, especialización y pregrado, (ii) utilizar el programa PAI para dar cabida y respuesta inmediata a la demanda de nuevos perfiles profesionales de pregrado, en las áreas de la ingeniería que demanda el país, y (iii) extender el PAI a egresados como un mecanismo de educación continua.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

¿Qué busca un estudiante al momento de ingresar a una universidad? Todo parece indicar que la gran mayoría de ellos persigue cumplir un programa de estudios que los conduzca a un Aula Magna donde, en un acto académico protocolar y ritual de iniciación, recibirán un diploma, que los autorizará, a partir de ese momento, a ejercer legalmente la profesión que aprendieron a lo largo de años de esfuerzo, estudio y sacrificio. En todas partes del mundo, esta gran masa de estudiantes culmina su educación universitaria y deja la universidad. De allí en adelante su formación post-universitaria toma otros derroteros, soliendo adoptar la forma de programas de capacitación profesional especializada, orientada a satisfacer los intereses de las empresas o entes estatales que los contratan como profesionales. Esta dinámica es prácticamente universal: igual ocurre entre ingenieros, médicos, abogados, educadores, etc, y es la misma en todos los países del mundo. En el contexto planteado por Kuhn, en su famoso libro *La Estructura de las Revoluciones Científicas* (Kuhn, 1983), y en lo que respecta a la ingeniería y a la Facultad de Ingeniería de la ULA, lo antes dicho aplica a lo que podríamos llamar la *ingeniería normal* y la *educación normal*, es decir, estamos hablando de los estados estacionarios de sistemas dinámicos (la ingeniería, la práctica habitual de la ingeniería, la educación para la ingeniería) bien conocidos, para cuyo análisis y control se cuenta con paradigmas ya establecidos y bien probados que, de aplicarse correctamente, le permitirían a nuestra Facultad de Ingeniería de la ULA, pero también a nuestras Facultades hermanas en la universidades serias de Venezuela, continuar produciendo ingenieros, de cuya calidad y capacidad hablan sus obras, tanto en Venezuela, como en diversos países del mundo.

Permítaseme regresar por un momento a los términos paradigmáticos: ingeniería normal, educación normal y estados estacionarios. En un país normal, en estado estacionario, no deberíamos estar preocupándonos mucho por la educación normal para el ejercicio de la ingeniería normal. A lo sumo deberíamos estar ocupándonos del mantenimiento y actualización de la plataforma tecnológica del sistema educativo normal para fabricar ingenieros normales, porque en los últimos 40 años nuestros cursos de cálculo, de física, de mecánica, termodinámica o teoría electromagnética no han variado substancialmente. No así nuestros laboratorios, nuestros instrumentos de cálculo o nuestros sistemas de generación de imágenes. Lamentablemente, en este momento de su historia, Venezuela ni es un país normal, ni está en un estado estacionario normal. Tampoco nuestras universidades, ni nuestras facultades de ingeniería, son normales, ni están en un estado estacionario normal. A pesar de todo lo antes dicho, de frente al país nacional y de cara a la historia, nuestras facultades de ingeniería deberían tener la profunda convicción de que la ingeniería normal y la educación para formar ingenieros normales son retos superados para ellas; esa es la parte fácil, ya transitada, de los retos que les plantea el presente y

el futuro inmediato. Los verdaderos retos que tienen por delante nuestras universidades y nuestras facultades de ingeniería, en particular, tienen que ver con las necesidades que plantea la formación de esa minoría de estudiantes, que por distintas y muy variadas razones, vienen a la Universidad, no a buscar un diploma para convertirse en profesionales normales, practicantes de algún tipo de normalidad, siempre dentro del paradigma de Kuhn, sino a convertirse en buscadores, en creadores, en asumidores de retos, en cruzadoras de fronteras, en levantadores de prohibiciones, en cuestionadores y destructores de verdades sacrosantas, en transformadores de realidades, en investigadores de lo oculto, en académicos, en soñadores, en fin, en intelectuales.

Para el sostenimiento y mejoramiento de un país se necesitan profesionales normales de primera línea. Para el progreso real de un país se necesitan poetas, artistas, investigadores, soñadores. En relación a este punto vale la pena leer el reciente discurso del Director de Orquesta Gustavo Dudamel (Dudamel 2016), en ocasión de la entrega de la Medalla Nacional de las Artes y la Medalla Nacional de las Humanidades, en Washington, DC, por parte del Presidente de los Estados Unidos de Norteamérica, Barack Obama.

2 FIULA: Una Selfie en Baja Resolución

Como institución educativa, la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes (FIULA) imparte programas académicos a nivel de pregrado, especialización, maestría y doctorado. Administrativamente, la FIULA cubre sus actividades de pregrado a través de una Escuela Básica y siete Escuelas de Ingeniería: Civil, Eléctrica, Geología, Geomática, Mecánica, Química y Sistema. La División de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, adscrita al Consejo de Estudios de Postgrado de la ULA, coordina el programa doctoral y los 23 programas de maestría y especialización de la FIULA. Además, a FIULA cuenta con diversos Laboratorios e Institutos de Investigación en áreas específicas, entre ellos: el Laboratorio de Formulación, Interfaces, Reología y Procesos FIRP, el Centro de Simulación y Modelos CESIMO, el Instituto de Fotogrametría, el Centro de Estudios en Microelectrónica y Sistemas Distribuidos CEMISID, el Centro de Investigaciones en Sistemología Interpretativa CSI, e innumerables grupos de investigación reconocidos oficialmente por las instancias encargadas del financiamiento y seguimiento de la investigación, tanto en la ULA como a niveles extrauniversitarios.

2.1 Efecto de la Crisis Nacional sobre la FIULA

Como Coordinador de la División de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, y en ocasión de las VII Jornadas Científico-Técnicas de nuestra Facultad, quisiera, en un documento público como éste, narrar la historia de logros e incuestionables aportes de nuestros Programas de Postgrado al desarrollo tecnológico e intelectual, no sólo de nuestro país,

sino de otros países hermanos donde, desde la distancia, hemos dejado huella, a lo largo de al menos tres décadas de actividad. Sin embargo, el momento no es para eso sino, como dirían mis ancestros margariteños, para intentar salvar el barco y reconducirlo a buen puerto.

La profunda crisis global que vive Venezuela en este momento es la manifestación simultánea, del éxito en destruir el entramado de tradiciones, valores, usos y costumbres que en una sociedad sostienen la economía y las relaciones sociales, incluidas las relaciones e interrelaciones de poder y, al mismo tiempo, del fracaso en sustituir la red y los paradigmas anteriores por una nueva red y un conjunto de nuevos paradigmas que conduzcan al país a un nuevo estado estacionario donde los problemas previamente existente hayan sido efectivamente resueltos. Cuando uno enfoca este problema desde el punto de vista de la teoría de sistemas dinámicos y de la teoría de control, el panorama es claro: se pretende controlar el comportamiento del conjunto de los estados de un sistema dinámico preexistente, cuya estructura topológica y algebraica fue destruida usando una estrategia del tipo divide y reina, no mediante la aplicación de leyes de control, como sería de esperar en condiciones normales, sino a través de una modificación, un rediseño, de la estructura topológica y algebraica del espacio de estados. Sin pretender pasar por historiador, no creo que exista ningún ejemplo exitoso de aplicación de esta estrategia de reestructuración social en la historia de la humanidad, y el caso venezolano sólo confirma ese trágico record histórico.

En Venezuela prácticamente todas las estructuras sociales han sido destruidas, y sólo han podido sobrevivir algunas instituciones, muy débiles, muy suaves o muy acuosas, sostenidas por valores ancestrales intangibles; tal es el caso de las iglesias y las universidades autónomas tradicionales que, por estar localizadas en la parte alta del espectro de la dinámica social, poco afectan el día a día de la su dinámica del poder, pero que en el largo plazo pueden derrotar a las “divisiones de tanques” porque, por su acuosidad y fluidez, tienen la habilidad de preservar la memoria milenaria social, a partir de la cual resurge la vida en todas las esferas del planeta. La vida es terca, como dijo sabiamente, un físico amigo recientemente.

Una Universidad, una Facultad, es lo que su planta profesoral, sus bibliotecas, sus laboratorios y sus proyectos en curso son. Ese es el cauce, lo permanente, a lo largo del cual fluyen sus estudiantes, lo transitorio.

La planta profesoral de la FIULA, quizá su mayor baluarte hasta hace pocos años y envidia de muchas instituciones universitarias de nuestros países hermanos de Latinoamérica, viene en franco proceso de reducción y deterioro en los últimos años. El proceso natural de jubilación de los profesores no ha sido compensado con la incorporación de nuevo personal de relevo y peor aun, en el último par de años somos testigos pasivos y mudos de un proceso de fuga de cerebros y talentos hacia otras latitudes, donde se le brinda mejores salarios y condiciones de vida a profesionales con

las calificaciones académicas de nuestros profesores. Este fenómeno, de reciente data en una Venezuela que nunca fue un país de emigrantes, sino que por el contrario siempre tuvo sus puertas abiertas a la inmigración, presenta varias facetas que deberían ser estudiadas y atacadas inteligentemente, sino para detenerlo, lo que luce difícil en las presentes circunstancias, al menos para atenuarlo y quizá hasta para usarlo positivamente, mirando al futuro a corto plazo. Lo que Venezuela vive en este momento no es un proceso inédito en la historia de la humanidad. Bien al contrario es un proceso que ya han vivido muchos países de Suramérica con regímenes dictatoriales de diversas naturaleza en el siglo pasado, y que fue vivido prácticamente en todos los países de Europa a lo largo del siglo XX, antes y después de la Segunda Guerra Mundial, en unos por unas razones y en otros por otras razones. Hay que decirlo claro y con todas las palabras: el hambre no reconoce ideologías, ni fronteras, ni dogmas religiosos, o como lo expresaba la sabiduría profunda de mi abuela Teotiste Rodríguez, “el hambre tiene cara de hereje”. Y cuando hablo de hambre, no sólo hablo de hambre en el sentido nutricional, cuantificable en gramos de proteínas, lípidos y carbohidratos. Hablo de hambre espiritual, como la que padecen los profesores universitarios competentes y bien formados, los artistas y los científicos, para quienes el hambre de libros, de pinceles y colores, de partituras y de fuentes de conocimiento, es tan poderosa o más que el hambre biológica, y que cual fuerza trópica primigenia e indetenible los hará moverse en la dirección de las bibliotecas, laboratorios, estudios de arte, salas de ensayo, donde alimentarse y desarrollarse, donde quiera que estén disponibles.

No se puede pretender mantener una planta de doctores, investigadores, artistas y científicos con sueldos miserables, que en ningún caso alcanzan los 100 dólares mensuales, y que no les permiten ni siquiera cubrir el costo de la alimentación básica de sus familias. Pero éste no es el único problema a atacar.

Buena parte de los Postgrados de la FIULA se mantienen vivos y activos, aunque cada día con mayor dificultad, gracias al trabajo sostenido y absolutamente desinteresado de profesores ya jubilados, que por razones naturales no podrán seguir manteniéndolos en el largo plazo. Se plantea un relevo generacional, en un contexto difícil por la falta de incentivos económicos y la poca identificación institucional de las generaciones de relevo emergentes, que reclaman, quizá con razón, una remuneración adicional por la docencia de postgrado, en muchos casos no reconocida como parte de la carga académica de los profesores por sus departamentos de adscripción en la ULA, como consecuencia de la saturación docente que padecen. Este problema debería ser atacado por las instancias superiores de la gerencia académica de postgrado de la ULA, porque su solución escapa a las posibilidades materiales individuales de los postgrados, e inevitablemente alimenta la aparición de mecanismos de pagos encubiertos poco transparentes. Como de costumbre, la parte fácil de resolver de este problema serían los aspectos económicos del mismo.

En mi opinión, sin embargo, este problema tiene una componente intangible, asociada a una fractura evidente en los sistemas de valores y de referencias morales y éticas de las generaciones emergentes, donde los individuos y los intereses individuales privan por encima de cualquier interés o necesidad colectiva, y donde la solidaridad, la tolerancia y la compasión han pasado a segundo plano como reguladores de la dinámica social.

La creciente falta de profesores competentes a nivel de postgrado se replica a nivel de pregrado, y la FIULA viene paleando las dificultades a través de diversas figuras: profesores jubilados activos, becarios académicos de postgrado, planes B, etc. Sin embargo, esto está inevitablemente condenado a colapsar, aunque en el ínterin se cubran apariencias y formalidades administrativas, que no garantizan la calidad de la enseñanza que reciben los estudiantes.

Si todo lo anteriormente expuesto sobre la vida académica de la FIULA es muy preocupante, no lo es menos la más reciente manifestación de la crisis económica en la ULA: la deserción estudiantil que crece día a día en todas las Facultades, ante la imposibilidad de cubrir los costos colaterales de la educación universitaria, agravada por lo que significa, en términos económicos, el colapso de instituciones de apoyo al estudiantado como el comedor universitario, el sistema de transporte y los servicios médicos.

2.2 *La Joya de la Corona: El Programa de Doctorado en Ciencias Aplicadas de FIULA*

De acuerdo con el Tao Te King (Lao Zi, 2007), Capítulo 76:

“Cuando una persona está viva, es blanda y flexible.
Cuando está muerta, se vuelve dura y rígida.
Cuando una planta está viva, es blanda y tierna.
Cuando está muerta, se vuelve marchita y seca.
Por ello, lo duro y lo rígido son compañeros de lo muerto; lo blando y lo flexible son compañeros de lo vivo”.

Uno podría pensar que en medio de esta gran crisis nacional global el programa de postgrado de la FIULA que más debería haber sufrido es nuestro Programa de Doctorado en Ciencias Aplicadas (DCA), y para sorpresa de propios y extraños, es nuestro programa de postgrado más robusto y estable. ¿A qué se debe esta aparente contradicción?

El DCA, tanto en espíritu como en implementación, está inspirado en la concepción europea tradicional de los doctorados por investigación, modernizada en cuanto a la imposición de condiciones objetivizables y verificables de producción académica, de acuerdo a estándares internacionales. El DCA cubre, en principio, todas las áreas de las ciencias aplicadas, lo cual significa, en la realidad, que abarca cualquier disciplina donde sea posible conseguir un Tutor, que podría no estar en Venezuela, que guíe el trabajo doctoral del aspirante, desde su propuesta inicial hasta su consecución final.

A diferencia del resto de los programas académicos de

la FIULA, su DCA no tiene una malla curricular rígida, con una escolaridad preestablecida, regida por un sistema de relaciones fijo e inmutable. Al ser el DCA un programa orientado a la investigación, es el proyecto de investigación doctoral el esqueleto sobre el cual se arma el programa de estudios individual, diseñado y cortado a la medida, de cada aspirante al grado de Doctor. Desde el punto de vista operativo cada aspirante a ingresar al DCA debe tener un tutor con quien elabora, sobre una base de corresponsabilidad, una propuesta académica de investigación, que tiene dos componentes fundamentales: la Propuesta de Tesis Doctoral y el Plan de Formación del aspirante. Esta propuesta conjunta del aspirante y el tutor es sometida a la consideración de una comisión de expertos ad-hoc, nombrada al efecto por el Consejo Directivo del DCA, que revisará y evaluará la propuesta y hará todas las observaciones y recomendaciones, de forma y de fondo, que estime convenientes, tanto a la Propuesta de Tesis Doctoral como al Plan de Formación presentado. Esta comisión evaluadora tiene la potestad de exigir modificaciones tanto al Plan de Formación, como a la Propuesta de Tesis Doctoral, así como también de proponer rechazar la solicitud, si tal fuese el caso. Para efectos de la propuesta académica que formularemos de inmediato, es importante recalcar que el Plan de Formación de un aspirante a ingresar al DCA puede diseñarse y construirse, según el Artículo 21 del Reglamento del DCA (Consejo Directivo del DCA 2013), a partir de: materias de nivelación, cursos avanzados, seminarios, actividades especiales, estancias de investigación y otras actividades especiales.

Más allá de los detalles administrativos y las formalidades académicas y protocolares, el DCA de la FIULA es quizá hoy en día su programa de postgrado bandera, con demanda sostenida de aspirantes tanto nacionales como extranjeros. La razón de ser de esto es muy sencilla, su flexibilidad y su capacidad de adaptación a múltiples escenarios le permite reclutar potenciales tutores en toda la FIULA, en toda la ULA, y bajo tutorías compartidas en cualquier universidad nacional o extranjera. Por otra parte, la naturaleza individualizada de los Planes de Formación, conjuntamente con la apertura a la posibilidad de estancias de investigación en cualquier institución académica de prestigio nacional o extranjera, le permite al DCA aprovechar la capacidad docente global de toda la ULA y de cualquier institución académica nacional o extranjera de prestigio para compensar las debilidades institucionales propias de la ULA. En las condiciones actuales de carencias, obsolescencia y decadencia de todas nuestras bibliotecas y laboratorios universitarios, es tema de vida o muerte, de mero instinto de sobrevivencia, el poder contar con el apoyo explícito o implícito de laboratorios y bibliotecas extranjeras para garantizar la sobrevivencia de nuestra estructura de estudios de postgrado, y también de pregrado, si pretendemos volver a resintonizarnos con la vanguardia del mundo en ciencia y tecnología ... en algún futuro cercano.

3 Primera Propuesta Académica: Maestría, Especialización y Pregrado en Ciencias Aplicadas

Sobre la base de todo lo planteado en la sección anterior, quisiera someter a la consideración de todas las instancias de nuestra FIULA una *Primera Propuesta Académica*, consistente en la creación de: un *Programa de Maestría en Ciencias Aplicadas*, un *Programa de Especialización en Ciencias Aplicadas* y un programa piloto experimental de pregrado de *Ingeniería en Ciencias Aplicadas*. El espíritu de esta propuesta es muy sencillo: en pocas palabras, se trata de crear programas académicos abiertos, flexibles y competitivos, cuyas estructuras mimeticen la del DCA de nuestra propia FIULA. Estos nuevos programas académicos en ningún momento interferirían con el funcionamiento de los programas académicos preexistentes, pero permitirían flexibilizar la oferta académica de la FIULA y nos permitiría explorar nuevas corrientes de la ingeniería contemporánea, para eventualmente hacer propuestas de nuevas carreras, más rígidamente estructuradas, orientadas a cubrir áreas específicas, si tal fuese el caso.

3.1 Maestría y Especialización en Ciencias Aplicadas

Implementar los programas de maestría y especialización propuestos debería ser un trabajo muy sencillo, porque la necesidad de flexibilizar nuestra estructura de postgrado actual es una necesidad sentida y compartida por todos los postgrados adscritos a nuestra División de Postgrado de la FIULA. A diferencia de lo que ocurría hace veinte o diez años atrás, todos nuestros postgrados padecen por igual hoy en día, la carencia de todo tipo de insumos y la fuga masiva de profesores altamente calificados. La necesidad de repensarnos, y como parte de ello optimizar el uso de nuestra planta profesoral más eficientemente, flota en el ambiente. La necesidad de establecer alianzas académicas, tanto intrauniversitarias como interuniversitaria, es algo que comienza ya a darse de hecho, aun cuando las dinámicas de los procedimientos y las estructuras administrativas universitarias estén notoriamente rezagadas. Los mecanismos de intercambios de estudiantes, profesores, recursos bibliográficos y de laboratorios va por el mismo camino, alimentado en algunos casos desde el exterior por nuestros antiguos colegas de la ULA, hoy radicados en otros países hermanos latinoamericanos y allende los mares. Esta dinámica global, aunque de pequeña escala, replica lo ya visto en otras épocas en las que se produjeron grandes emigraciones de académicos de otros países latinoamericanos, de países como China, India, Pakistán, y también de países de la antigua Europa Oriental.

La primera fase de la implementación de estos programas de maestría y especialización en ciencias aplicadas, aunque imperfecta, podría ejecutarse de inmediato integrando recursos de programas de postgrado afines e incrementando el número de electivas de los programas. Al ser éstas modificaciones curriculares menores en programas ya existentes, su aprobación no debería presentar mayor dificultad.

3.2 ¿Un Pregrado de Ingeniería en Ciencias Aplicadas?

La propuesta de bajar el espíritu del DCA hasta el pregrado podría ser vista como una propuesta poco ortodoxa, arriesgada y quizá ser calificada de prematura y desubicada, dado que los estudiantes de pregrado están en su primera fase de formación, por lo general no están autónomamente orientados hacia la investigación, y por el contrario, mayoritariamente están interesados en formarse para al ejercicio de lo que hemos llamado la ingeniería normal. El programa de Ingeniería en Ciencias Aplicadas (ICA), estaría diseñado para atraer a esa minoría de estudiantes automotivados, en busca de grandes retos intelectuales y profesionales, que exigen enfoques multi, inter y transdisciplinarios, que están inmersos en grandes incertidumbres y que habitualmente llevan a las fronteras del conocimiento. Este no sería, ojalá me equivoque, un programa para grandes masas de estudiantes; todo lo contrario, lo concibo de entrada como un caminito angosto y lento de exploración personal e intelectual, eso sí, asociado a retos y experimentos intelectuales. Este programa, desde el punto de vista institucional de la FIULA, debería pensárselo como parte integral del aparato de investigación y desarrollo de la Facultad, una de cuyas funciones colaterales debería ser la de reclutar jóvenes talentosos, con espíritu de aventureros, músculos de maratonistas y capacidad innata de asumir riesgos racionales, tal cual se hace en todos los países desarrollados del mundo, siempre a la caza de talentos, en todas las esferas del saber y de la acción humana.

3.3 ¿Cómo podría implementarse el programa ICA? ¿Cómo podría transmutar el DCA en ICA?

Muy sencillo. La primera característica del DCA que el ICA debe heredar es la flexibilidad. El ICA podría estructurarse en tres grandes bloques, de dos años fundacionales, dos años de estudios en profundidad y un año final de investigación y desarrollo. Un poco en el espíritu universitario germano (donde el requisito universal de ingreso a la universidad, la Matura, es un examen de alemán y matemáticas) los dos años fundacionales estarían dedicados a estudiar matemáticas, física e idiomas (español, inglés y computación). Culminados los dos primeros años se seguiría exactamente el mismo esquema del DCA: el aspirante al ICA, en conjunto con su tutor, introduciría una propuesta al Comité Directivo de ICA que debería contener, una Propuesta de Tesis y un Plan de Formación. El Programa de Formación definiría el contenido de los dos años de estudios en profundidad, y la Propuesta de Tesis se desarrollaría a lo largo del quinto año. Al igual que en el DCA, el Comité Directivo del ICA, evaluaría las solicitudes de ingreso y agenciaría lo necesario para que el aspirante pueda adquirir, en la ULA o en cualquier otra institución académica de prestigio, nacional o extranjera, los conocimientos necesarios para completar su Plan de Formación.

Un par de comentarios respecto a los dos años fundacionales. En mi opinión, el éxito de un programa como el ICA

dependería fuertemente de que los dos años fundacionales, estuviesen efectivamente dedicados a equipar la aspirante con una sólida base en matemáticas, física e idiomas. La formación en matemáticas debería entrenar al aspirante para pensar matemáticamente y no sólo para ejecutar cálculos repetitivos poco comprendidos en su significado. La formación en física debería estar orientada, no sólo a estudiar las leyes básicas de la mecánica y los campos electromagnéticos, sino a crear en el aspirante al ICA la conciencia de que la física, la química, la biología, etc. son herramientas y métodos de modelaje de fenómenos naturales. También deben garantizar los dos años fundacionales el dominio de varios idiomas, sin los cuales el progreso en una carrera científica es muy difícil. Un aspirante al ICA debe tener claro que el lenguaje de la ciencia y la tecnología es el inglés, tal como el latín era el lenguaje universitario europeo en la edad media y el renacimiento. Para un aspirante al ICA debería ser un hecho natural, y deseable, poder insertarse suavemente en un grupo de trabajo internacional, tal cual sucede hoy en la UE, donde muchas universidades de diversos países incluso contratan profesores extranjeros para que dicten asignaturas en inglés, aun contando con expertos capaces de dictar las mismas asignaturas en los idiomas locales. Tampoco hay ciencia y tecnología hoy en día sin un adecuado dominio de las herramientas básicas de computación. Al respecto me atrevería a hacer la recomendación de que se piense a la computación en un sentido amplio, simbólico-gráfico-numérico, integrado, y no meramente numérico como ocurre actualmente. Finalmente, alguien podría preguntar, ¿por qué estudiar español?. Según el criterio tradicional germano, si un universitario sabe matemáticas, debería poder pensar racionalmente en cualquier campo del saber, y si sabe alemán debería poder leer cualquier texto y extraer de él la información relevante a sus fines particulares. Lamentablemente, el nivel de dominio del castellano, por parte de los estudiantes que ingresan a nuestras universidades, es cada día más precario en Venezuela. Al final de los dos años fundacionales los estudiantes del Programa ICA deberían haber superado este tipo de limitaciones.

Al igual que en el caso de las maestrías y especialidades en ciencias aplicadas, el programa ICA debería ser implementado en dos fases, una inmediata, necesariamente imperfecta, y otra mediata, mucho más acabada. La implementación inmediata, utilizando la malla académica actualmente existente y vigente en la ULA, podría hacerse utilizando el Programa Académico Interdisciplinario (PAI) de la Facultad de Ciencias, abierto a todos los estudiantes de la ULA. A ello está dedicada la próxima sección de este ensayo.

4 El Programa Académico Interdisciplinario de la Facultad de Ciencias de la ULA

4.1 Origen del PAI

El Programa Académico Interdisciplinario (PAI) de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes, tiene

su antecedente en el *Proyecto Programa de Ampliación Curricular Interdisciplinario (PACI) de la Facultad de Ciencias* (Millán 2002), presentado en noviembre de 2002, por el Prof. Enrique Millán, en nombre de la Comisión de Estudios Interdisciplinarios de la Facultad de Ciencias, ante el Consejo de la Facultad de Ciencias. A lo largo de un año, luego de múltiples presentaciones del Proyecto en diversos foros, este documento evolucionó para transformarse en el *Proyecto Programa Académico Interdisciplinario (PAI) de la Facultad de Ciencias* (García 2003), introducido en diciembre de 2003 ante el Consejo de Facultad de la Facultad de Ciencias de la ULA, por la comisión de estudios interdisciplinarios, encabezada por la entonces Decana de la Facultad, la Prof. Dra. Patricia Rosenzweig. Este Proyecto sería posteriormente sometido a la consideración de las diversas instancias superiores de la ULA, para ser finalmente aprobado por el Consejo Nacional de Universidades (Zambrano, 2005), en su sesión ordinaria del 18 de marzo de 2005.

4.2 ¿Qué es el PAI?

El PAI (García 2003) es un programa académico experimental de la Facultad de Ciencias de la ULA, originalmente concebido y diseñado con el objetivo de darle la oportunidad a los estudiantes de dicha Facultad, de adquirir la formación básica de una de sus carreras tradicionales: Matemáticas, Física, Química y Biología, complementándola, ampliándola y reforzándola con la adquisición de conocimientos en otras áreas del saber, bajo un esquema de: intradisciplinariedad, interdisciplinariedad o transdisciplinariedad. Valga mencionar, por completitud y lenguaje, que la Facultad de Ciencias es una facultad departamentalizada. Así, el PAI Intradisciplinario persigue que un estudiante se forme en dos áreas distintas de un mismo departamento. Un estudiante de un PAI Interdisciplinario, adquiriría la formación de su departamento primario de adscripción (Matemática, por ejemplo) y la complementaría en otro departamento (Física, por ejemplo). En un PAI transdisciplinario el estudiante obtendría la formación de su departamento de adscripción (Física, por ejemplo) y la complementaría en otra Facultad (Escuela de Música, de la Facultad de Arte, por ejemplo).

4.3 ¿Cómo Funciona el PAI?

El PAI se rige por la Normativa del Programa Académico Interdisciplinario, sabiamente resumida en dos páginas, en el Anexo 1 de (García, 2003). Este documento, tiene sólo 13 artículos: 1 y 2 dedicados a las funciones de la Coordinación del PAI, 3 y 4 regulan la admisión de estudiantes al PAI. Los artículos 5 al 8 norman la permanencia de los estudiantes del PAI. El 9 rige el desarrollo del Trabajo Especial de Grado, y el 10 establece los requisitos para completar el PAI. El 11 norma la Emisión de la Credencial del PAI. El 12 regula la deserción y el 13 rige la solución de conflictos.

Los aspectos esenciales de la Normativa del PAI son:

(i) Existe un Comité Coordinador, constituido por cuatro miembros, representantes de los Departamentos de la Facultad de Ciencias, que planifica, organiza, regula, coordina, administra y tramita todo lo concerniente al funcionamiento del Programa.

(ii) Los aspirantes a ingresar al PAI deben: a) hacer una solicitud al Comité Coordinador, b) haber completado al menos el 60 % de las unidades crédito de su carrera de adscripción, c) tener un rendimiento académico superior al 75%, y d) haber obtenido la aprobación de la solicitud presentada al Comité Coordinador del PAI.

(iii) El programa académico que sigue cada estudiante del PAI es un programa individual, hecho a la medida, que debe ser aprobado por el Comité Coordinador, y que sólo puede ser modificado una vez.

(iv) Para obtener la Credencial del PAI, el estudiante debe haber aprobado, como mínimo, un número de unidades crédito equivalente al 12% de la totalidad de las unidades crédito de su programa de adscripción primario, en cursos, seminarios, u otras actividades académicas establecidas en el programa académico diseñado para él y aprobado por el Comité Coordinador del PAI.

Del estudio, tanto del Proyecto del PAI como de su Normativa, queda muy claro, y de allí se ha derivado su gran éxito, que el PAI es un programa de excelencia, dirigido a estudiantes de alto rendimiento, automotivados, con probada capacidad de asumir retos y alcanzar metas.

4.4 Ventajas y desventajas del PAI

Como programa de la Facultad de Ciencias, el PAI le brindó a sus estudiantes de alto rendimiento una oportunidad excepcional para, una vez cumplido el 60% de sus programas de estudios de adscripción, dejar de ser estudiantes de una facultad, para convertirse en estudiantes de una universidad global, con la posibilidad de complementar la formación de su carrera matriz, con actividades académicas desarrolladas virtualmente en toda la ULA.

La desventaja, si se la puede ver como tal, es que para completar el PAI un estudiante debe cumplir, como mínimo, con el equivalente al 112% de las unidades créditos de su programa de estudio original de adscripción, lo que habitualmente se traduce en, al menos, dos semestres adicionales de estudios. En todo caso, este es un programa de carácter voluntario, que no modifica los requisitos de egreso de la carrera de adscripción inicial de los participantes en él. El PAI tampoco interfiere, ni prohíbe, que un estudiante del PAI egrese de su carrera original de adscripción y posteriormente culmine y reciba su certificación de haber cumplido con la totalidad de los requisitos académicos del PAI, lo cual ocurre en otro acto académico diferente al de su acto de grado. Así, de hecho, todo aquel que recibe el Certificado del PAI, es ya un egresado universitario al momento de recibirlo.

4.5 El PAI en la actualidad

Si bien el PAI es un programa académico experimental de la Facultad de Ciencias, hoy en día está abierto a todos los estudiantes de todas las carreras de la ULA, siempre y cuando cumplan con los requisitos de excelencia académica exigidos por la normativa del PAI. Esto se traduce, en la práctica, en casos concretos conocidos de cerca por el autor, donde, por ejemplo, una estudiante de la Facultad de Odontología, hizo un PAI transdisciplinario, cursando materias de la Escuela de Ingeniería Mecánica, en el área de resistencia de materiales y materias del área de fotografía en la Facultad de Arte. O el caso, por ejemplo, de un estudiante de Biología de la Facultad de Ciencias, que hizo un PAI transdisciplinario realizando actividades académicas en el Laboratorio de Fisiología de la Conducta, en la Facultad de Medicina, y cursando materias del área de fotografía en la Facultad de Arte. Casos únicos e interesantes como los dos señalados abundan. El PAI llegó, llegó para quedarse, y cada vez encuentra uno, más y más estudiantes en todas las Facultades de la ULA que son estudiantes del PAI.

4.6 ¿Qué le ofrece el PAI a la Facultad de Ingeniería?

Conviene señalar, para comenzar, que el PAI es un programa académico experimental, que existe, de hecho y de derecho, y que por lo tanto no requeriría la aprobación de ninguna otra instancia burocrática, intra o extrauniversitaria, para ser utilizado por la Facultad de Ingeniería, de inmediato, aquí y ahora, como un mecanismo, quizá transitorio, de ensayo de alternativas curriculares novedosas e inexistentes en el país. Al ser el PAI, además, un programa dirigido a estudiantes automotivados, de alto rendimiento, su éxito estaría, poco menos que, garantizado de antemano.

5 Segunda Propuesta Académica

La Facultad de Ingeniería, debe tomar un rol activo en la promoción institucional del PAI entre los estudiantes y las unidades académicas de la Facultad, con la finalidad de hacer algunas propuestas flexibles de posibles programas académicos de punta a través del PAI. Si estos experimentos académicos resultasen exitosos podrían dar lugar a posteriores nuevas carreras en la Facultad de Ingeniería. Algunos ejemplos, entre otros, de programas que la Facultad de Ingeniería podría abordar de inmediato son:

Ejemplo 1. Ingeniería Biomédica. La FIULA cuenta con un grupo de profesores que viene desarrollando actividades de investigación en diversas áreas de la bioingeniería: el procesamiento de señales electrocardiográficas, procesamiento de imágenes médicas, aplicación de ciencias de los materiales en biomedicina, modelación, análisis y diseño de modelos matemáticos de procesos biológicos, entre otras. Formalizar una carrera en Ingeniería Biomédica en la FIULA sería poco

más que una reforma cosmética a la actividad ya en curso en la Facultad. Para ellos habría que ofertar formalmente asignaturas en algunos temas: Modelación de Sistemas Biofísicos y Fisiológicos. Procesamiento de señales biofísicas. Procesamiento de imágenes médicas. Instrumentación electrónica médica.

Ejemplo 2. Ingeniería Matemática. Como en todas las facultades de ingeniería serias del mundo, la Facultad de Ingeniería de la ULA debería promover el desarrollo de programas académicos que refuercen la formación de pequeños grupos de ingenieros con la adquisición de una formación matemáticamente sólida y rigurosa en áreas como: sistemas dinámicos no lineales, ecuaciones diferenciales parciales y aplicaciones, computación científica simbólico-gráfica-numérica integrada, álgebra lineal y sus aplicaciones computacionales, modelado matemáticos de sistemas complejos, etc.

Ejemplo 3. Ingeniería en Mantenimiento de Hospitales. Hace unos 20 años atrás el Postgrado en Ingeniería en Control y Automatización y el Postgrado de Mantenimiento, hicieron una propuesta, al ente gubernamental correspondiente del momento, de una maestría en mantenimiento de hospitales. Hoy, más que nunca es urgente y por demás importante, ofrecer alternativas al país para formar ingenieros capaces de atacar científica y tecnológicamente la crisis hospitalaria generalizada que padecemos. Buena parte de esta crisis permanente, se debe a la falta de políticas de mantenimiento correctamente llevadas. La Facultad de Ingeniería cuenta con recursos docentes para desarrollar un PAI intradisciplinario exitoso en esta área.

Ejemplo 4. Ingeniería + Arte. Muchas de las manifestaciones contemporáneas de las artes audiovisuales requieren un gran soporte científico, tecnológico y computacional. En algunas universidades internacionales de gran prestigio se viene dando un proceso de convergencia entre arte, ciencia y tecnología, para darle soporte a la industria cultural. Con los Profesores Raúl Hernández y Fernando Burgos, del Grupo de Investigación GAMAD, de la Escuela de Artes Visuales, de la Facultad de Arte, venimos considerando la posibilidad de proponer talleres y asignaturas electivas en las áreas de matemáticas, física, computación, circuitos, electrónica para estudiantes de arte, que faciliten la integración de equipos multidisciplinarios con estudiantes de ingeniería y computación para desarrollar proyectos audiovisuales conjuntos. Los estudiantes de ingeniería podrían andar el camino complementario: física de la fotografía, física y matemáticas de la música, síntesis artificial de señales e imágenes, soporte computacional de la industria cultural, etc.

6. Tercera Propuesta Académica: Extensión del PAI a Egresados Universitarios

Tal como se estableció en la sección anterior, el PAI le brinda a los estudiantes avanzados de alto rendimiento la posibilidad de acceso a un espectro de formación global, intra, multi, inter o transdisciplinaria que trasciende los límites de su propia carrera original de adscripción. Este tipo de aperturas académicas están siendo ampliamente utilizadas en los países del primer mundo para formar profesionales altamente competitivos en áreas emergentes, donde los programas de formación tradicionales de las universidades no pueden suplir las necesidades y exigencias del ejercicio profesional contemporáneo. A manera de ejemplo, valdría la pena señalar que en China, un país con una clara conciencia de su rol en el mercado mundial, actualmente sólo un pequeño porcentaje de los estudiantes de idiomas extranjeros estudian en las escuelas de idiomas tradicionales, y que la preferencia de los estudiantes se ha desplazado hacia los programas de estudios de idiomas extranjeros ofrecidos por las facultades de economía, de administración de empresas, de negocios internacionales, y hasta de ciencia y tecnología, como es el caso de la Universidad Jiaotong de Beijing, donde el inglés es visto como una herramienta primordial de comunicación de la comunidad científica y tecnológica internacional, por lo que ofrecen un programa de inglés especializado en la generación y traducción de textos científicos. Evidentemente, Venezuela tiene un atraso de décadas en estas direcciones que rigen las políticas académicas en muchas instituciones primermundistas.

La ULA podría contribuir considerablemente a subsanar estas limitaciones actuales de la formación de recursos humanos en Venezuela, utilizando el PAI como la base de un sistema, por una parte de educación continua de profesionales y por la otra como un mecanismo de formación complementaria de jóvenes altamente competentes y competitivos, interesados en realizar estudios interdisciplinarios de postgrado en el extranjero, en áreas no cubiertas por la plataforma de estudios de postgrado existentes en el país. Pero ello exige pensar la Universidad como un sistema académico global. “Pensar a la ULA como un tal sistema académico global permitiría, con costos mínimos, desarrollar múltiples programas académicos novedosos y vanguardistas como los que el desarrollo del conocimiento demanda en la actualidad, y en los cuales nuestro país está muy atrasado. Por otra parte, siguiendo las enseñanzas fundamentales de la biología, la implementación de programas novedosos debe tener carácter experimental y local, de tal forma que no comprometan la eficacia y la tradición de los programas tradicionales, ya sólidos y bien fundamentados. Si las mutaciones resultan favorables se aceptan e institucionalizan, si tal fuese el caso, en caso contrario se eliminan, sin dañar el esqueleto académicos fundamental y tradicional de la Universidad” (Rodríguez-Millán y col., 2015).

6.1 La Propuesta

Si algo transmite la lectura de la normativa del PAI es el deseo de sus promotores de crear un programa abierto, flexible, funcional y operativo. A diferencia de la tendencias hiperreguladoras actuales de los reglamentos universitarios, ciertamente montadas sobre la desconfianza absoluta de todas las instancias de una sociedad en la que nadie confía en nadie, la normativa del PAI pareciera inspirada en la sabiduría ancestral de algunas civilizaciones orientales antiguas (Lao Zi 2007), que procuran que las normas que regulan las organizaciones sociales tengan dos características: ser muy breves y promover en vez de prohibir. Así, la normativa del PAI, básicamente nombra un Comité Coordinador, cuya misión es agilizar y operativizar el programa, y establece algunos requisitos mínimos de ingreso y egreso para los estudiantes que aspiren a obtener el certificado del PAI.

Específicamente, el ingreso de estudiantes al PAI está regulado por los Artículos 3 y 4:

Artículo 3: Los aspirantes a ingresar al PAI deberán haber cursado al menos el equivalente al 60% del total de las Unidades Crédito (U.C.) requerida por la carrera de adscripción incluyendo el trabajo especial de grado y haber logrado un rendimiento académico superior al 75%. Para optar al PAI, el interesado efectuará una solicitud por escrito de acuerdo al formato diseñado para tal fin.

Artículo 4: La admisión del aspirante al PAI requiere de la aprobación del Comité Coordinador.

Muy respetuosamente, me atrevo a solicitar, como parte integral de la propuesta académica que desde la División de Postgrado de la Facultad de Ingeniería formulo a la Facultad de Ingeniería, que *se estudie la pertinencia de permitirle a egresados universitarios incorporarse al PAI, como parte de una estrategia institucional de formación de recursos humanos intra, multi, inter y transdisciplinarios*, que el país en su conjunto, y la comunidad académica y científica en particular, requiere con urgencia.

6.2 Aspectos Formales de la Propuesta

Ciertamente, la letra del Artículo 3 de la normativa del PAI ni prohíbe, ni excluye, la incorporación al PAI de estudiantes que hayan cumplido el 100%, ya que lo que estrictamente exige es “haber cursado al menos el equivalente al 60% del total de las Unidades Crédito (U.C.) requeridas por la carrera de adscripción, incluyendo el trabajo especial de grado”. Obviamente, todo egresado universitario cumple este requisito, porque para graduarse necesariamente debió cumplir con el 100% de las U.C. de su carrera, de donde, necesariamente cumplió con el 60% de las mismas. Así, el obstáculo a vencer, en caso de que haya algún obstáculo que vencer, para permitir la incorporación de un egresado universitario al PAI es un estado mental, una expectativa mental, no una

prohibición reglamentaria explícita.

6.3 Bondades de la Propuesta

El ingreso de egresados universitarios al PAI sería un camino para dar solución a diversas necesidades académicas frecuentes. Consideraremos algunos ejemplos ilustrativos.

Ejemplo 5. Efectos de la crisis global del país sobre los estudiantes universitarios: La crisis económica estructural que padece Venezuela, que lamentablemente tardará muchos años en resolverse, está alterando profundamente los proyectos de vida de los estudiantes universitarios, y muy particularmente el de los estudiantes de alto rendimiento, que cada día focalizan y optimizan sus estrategias de progresión curriculares para graduarse en el mínimo tiempo posible, emigrar e iniciar proyectos de vida en otros países que ofrecen mejores expectativas de vida y de desarrollo personal y profesional. Los pocos estudiantes de alto rendimiento que permanecen en el país igualmente asumen las mismas estrategias curriculares, por las necesidades económicas apremiantes. De permitírsele a egresados universitarios ingresar al PAI, algunos de estos estudiantes de alto rendimiento que permanecen en el país, con toda seguridad ingresarían al PAI.

Ejemplo 6. ¿Dónde se podría formar un Iannis Xenakis o un John Williams en Venezuela? Sin que me quede la menor duda, mi respuesta a esta pregunta sería: ¡en la ULA!. Repito, ¡en la ULA!, no en la Escuela de Música de su Facultad de Arte, ni en las Escuelas de Ingeniería de Sistemas o de Ingeniería Eléctrica de su Facultad de Ingeniería, ni tampoco en los Departamentos de Matemáticas o de Física de su Facultad de Ingeniería. Un Iannis Xenakis (Wikipedia) podríamos formarlo en esa ULA que en este ensayo he calificado como la “ULA GLOBAL”, y quisiera justificar el por qué de esta convicción.

Durante el reciente período de cursos intensivos 2016, el Prof. Raúl Hernández, quien ha sido mi maestro en la Facultad de Arte durante los últimos años, me invito a participar en la asignatura Medios Audiovisuales, que él dictó para los estudiantes de la Escuela de Diseño Gráfico. Como suele exigir en todos sus cursos, los estudiantes debían desarrollar un proyecto individual, en este caso un poema audiovisual de no más de un minuto de duración. Se trataba, no sólo de desarrollar la parte visual de un video, sino también la banda sonora del mismo. Opté por una metáfora visual sobre el origen del universo según la cosmovisión taoísta y concentré mi esfuerzo en el desarrollo de la banda sonora.

La fertilización cruzada existente entre ciencia, arte y tecnología no es ningún invento o descubrimiento contemporáneo; bien al contrario, es tan vieja como la humanidad misma, tanto en las culturas orientales como en las occidentales (Root-Bernstein 1992). Quizá la gran novedad en este campo sea la toma de conciencia de la necesidad de abordar

el tema multi e interdisciplinariamente, como lo testimonia el hecho de que el famoso Director de Orquesta alemán Herbert von Karajan, dedicase la edición de 1984 del *Diálogo Musical de Salzburg* (*Salzburger Musikgespräch* 1984) al tema *Musik und Mathematik*, recopilado y editado, en forma de libro, por Götze y Wille (Götze und Wille, 1984). El amor por la música entre los físicos y matemáticos es más que conocida; igualmente las investigaciones matemáticas y físicas de los músicos también están bien documentadas. Sin embargo, inicialmente, los músicos suelen formarse como músicos, los científicos como científicos, y sólo más tarde aparecen, en la mayoría de los casos, las hibridaciones.

Para construir el “órgano de tubos” de mi poema audiovisual utilicé Mathematica como herramienta de soporte computacional, elementos de teoría de señales como soporte a la generación de sonidos y algunos conceptos de sucesiones para secuenciar sonidos aleatorios. Una vez “puesto a punto el órgano” comenzó el juego de crear un “lenguaje musical”, es decir un conjunto de reglas gramaticales, sintácticas y semánticas para concatenar sucesiones de sonidos aleatorios para la “banda sonora del video”. Todo este trabajo está apenas en pañales, pero de querer continuarlo, inevitablemente debería buscar apoyo en la Escuela de Música de la ULA, para que algún profesor compasivo de armonía y composición, me dicte un curso para dummies en un par de días.

Este micro-proyecto de “música aleatoria”, entiéndase ruidos tormentosos y tenebrosos, desarrollado en la ULA durante el intensivo 2016, me llevó a la convicción absoluta de que el sitio para formar a los futuros Iannis Xenakis y John Williams (Wikipedia) de la música contemporánea en Venezuela, si existe, se llama ULA-GLOBAL: tenemos escuelas de ingeniería eléctrica y sistemas, de física y matemáticas, de música y diseño gráfico, y tenemos el PAI. Falta el trabajo y la disposición mental para hacerlo.

Ejemplo 7. ¿Cómo Nivelar Estudiantes que Desean Trabajar en Areas Interdisciplinarias a Nivel de Postgrado? Recientemente el Doctorado en Ciencias Aplicadas de la Facultad de Ingeniería me encomendó presidir la Comisión Evaluadora encargada de estudiar la propuesta de investigación y el programa de formación académica de un aspirante a ingresar a nuestro Doctorado, interesado en desarrollar una propuesta de trabajo doctoral en análisis de dinámicas cualitativas en sistemas dinámicos de control de convertidores de potencia. Esa propuesta de trabajo doctoral es multidisciplinaria, porque involucra tres disciplinas distintas: teoría cualitativa de sistemas dinámicos no lineales, control de sistemas no lineales y convertidores de potencia, pero apunta claramente al desarrollo de un trabajo interdisciplinario por el tipo de resultados esperados. El aspirante, un Ingeniero de Sistemas egresado de nuestra Escuela de Ingeniería de Sistemas, tiene la formación básica en teoría de control que brinda EISULA, pero debe complementarla con temas que se cubren

en profundidad en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, y también con temas de álgebra, topología, análisis y sistemas dinámicos no lineales cubiertos habitualmente en la licenciaturas en matemáticas. La recomendación de la comisión evaluadora de la propuesta fue, por unanimidad, que el aspirante debería nivelar su formación académica de pregrado, cubriendo los aspectos de matemáticas e ingeniería eléctrica de potencia en los que no tiene formación alguna, para de esta forma garantizar el éxito en su programa doctoral. Ahora bien, ¿cómo podría implementarse esta recomendación de la Comisión Evaluadora?

La primera propuesta fue dividir su programa de estudios en dos etapas, realizando primero una maestría que le permitiese nivelar su formación, desarrollar una tesis de maestría en el mismo tema, de tal forma de adueñarse del problema particular a estudiar, y luego continuar el trabajo de investigación duro y de avanzada en una tesis de doctorado. Si bien esto podría ser un abordaje del problema, la Facultad de Ingeniería no cuenta con una maestría híbrida que satisfaga los recomendaciones de la Comisión Evaluadora. Quizá la oferta de postgrado más flexible y cercana a las necesidades de este caso sea nuestra Maestría en Matemáticas Aplicada, la que le permitiría cursar las asignaturas que necesitase en los postgrado de la Escuela de Ingeniería Eléctrica. Sin embargo, paradójicamente, la Maestría en Matemáticas Aplicadas no podría cubrir los contenidos matemáticos que este aspirante necesita, porque en dicha maestría no se estudia álgebra, topología, sistemas no lineales ni geometría diferencial.

¿Cuál sería la solución a un caso como este? Después de analizar el caso en detalle, y en parte como consecuencia de mis propias conversaciones con el Coordinador de la Maestría en Matemáticas Aplicadas, la conclusión fue que lo que debería hacerse con un aspirante como éste era diseñarle un programa PAI para que estudiase álgebra, topología, análisis funcional y ecuaciones diferenciales ordinarias en la Facultad de Ciencias, y estudiase convertidores de potencia en la Escuela de Ingeniería Eléctrica. Diseñado este traje a la medida para nuestro aspirante a Doctor, ¿cómo lo cortamos y cosemos?. En las condiciones actuales, esta solución tampoco podría implementarse, a pesar de contar con todos los recursos humanos y académicos para hacerlo, porque, a pesar de no estar explícitamente prohibido por la Normativa del PAI, el consenso social supone que el PAI no puede admitir egresados universitarios.

Como los tres “casos de estudio” descritos anteriormente, podría continuar enumerando múltiples casos reales e hipotéticos, que podrían ser canalizados y satisfactoriamente resueltos a través del PAI, con tan sólo conmutar nuestro estado mental actual para trascender de una ULA multicultural a otra ULA multicultural, pero también intercultural y transcultural. Esto significa, en términos topológicos, sustituir el recubrimiento disjunto multifacultad actual de la ULA, por un recubrimiento tipo variedad diferenciable, donde se admite la intersección entre los abiertos de los sistemas de coordenadas locales, y donde los cambios de coordenadas

permitirían las transiciones suaves entre diversas culturas y paradigmas académicos, habitualmente excluyentes en las organizaciones multiculturales, sin interculturalidad o transculturalidad real. Algunas de estas ideas han sido expuestas, en otro contexto, en (Rodríguez-Millán, 2016), otro trabajo presentado en estas mismas VII Jornadas Científico-Técnicas de la Facultad de Ingeniería 2016. Desde un punto de vista sistémico, o matemático, el problema de la intra, multi, inter y transdisciplinaridad tiene un paralelo en el problema del inter, multi y transculturalismo estudiado por historiadores, politólogos y sociólogos, entre otros (Sarmento 2014).

En la ULA ya están dadas las condiciones para el cambio de paradigma cultural propuesto, y de hecho ya existen experimentos al respecto andando, aun cuando la gente no los perciba, quizá porque por ser muy pocos, pasan desapercibidos. Cuando inicié mis estudios universitarios en 1970 soñaba con estudiar en una universidad que me permitiese estudiar ingeniería, pero también matemáticas, idiomas, música y luego neurociencias. Esa universidad con que soñaba en 1970, comenzó a reflotar en mi mente hace unos diez años atrás cuando algunos de mis colegas de la Facultad de Ingeniería me comenzaron a invitar a hablar sobre mis viajes a Asia, y en particular sobre las visiones budistas y taoístas sobre temas relacionados a la ciencia occidental, por llamarlo de alguna manera. Sin embargo, la ULA GLOBAL, de la que ahora hablo en los dos trabajos que decidí presentar en estas VII Jornadas de nuestra Facultad, realmente la descubrí hace unos cuatro años atrás, cuando el Prof. Raúl Hernández, del Departamento de Diseño de la Escuela de Diseño Gráfico de la Facultad de Arte, me permitió incorporarme a su curso FOTO 1. Allí nació una saga cuyos próximos capítulos, en la Facultad de Arte, fueron: Expresión Fotográfica, FOTO 2, Historia General del Arte, Medios Audiovisuales, el taller El Proyecto Fotográfico y Design Thinking y próximamente el Curso Introductorio a la Fotografía Still Life en Estudio. Después de todo este tiempo en la Facultad de Arte, su Grupo de Investigación GAMAD terminó incorporándose como un miembro más, quizá con un poco de resignación. Este semestre pasado me jubilé de la Facultad de Arte y me fui a la Escuela de Historia de la Facultad de Humanidades y Educación, donde seguí las asignaturas Historia de Asia, y China: Reforma y Apertura, bajo la batuta de mi joven amigo y experto en historia de Asia, el Prof. Norbert Molina. Como se dice en el lenguaje del cine, la saga ¡CONTINUARA! ... porque de una u otra manera lo que estoy haciendo es cubriendo requisitos para embarcarme, mejor preparado, en un proyecto de investigación mayor que he dado en llamar El Camino de la Seda.

7. El Progreso es un Estado Mental

Si algo enseña la vida, los años y el viajar por el Mundo es que el progreso, más que un estado físico, es un estado mental, íntimamente ligado a la libertad de conciencia, a la libertad de pensamiento, y al no tener miedo a asumir riesgos

intelectuales calculados. Ese estado mental condiciona prácticamente todos los aspectos de la vida y de la conducta de un ser humano.

Cuando uno viaja hoy a Colombia, por el paso de Boca del Grita a Puerto Santander, puede evaluar fácilmente la diferencia de estados mentales a ambos lados de la frontera: del lado venezolano la comunicación es prácticamente interrumpida por cada uno de los angostísimos puentecitos contruidos para detener una invasión colombiana que nunca se dio, en una época en que la gente se desplazaba a pie y en la cual la carga se transportaba a lomo de mula. Todo esto sin entrar a considerar el papel adicional de filtro pasa-nada asignado por el estado a los organismos de seguridad venezolanos en la zona. A diferencia de los venezolanos, del lado colombiano, los colombianos construyeron un puente amplio de dos canales que sustituye al viejo puentecito monocal, al estilo de los venezolanos, en la carretera que comunica Puerto Santander con Cúcuta. El viejo puente angosto quedó al lado, como un sistema redundante de paso en caso de emergencias. Ese *expandir el horizonte* es lo mismo que uno observa en Estados Unidos y en la Comunidad Europea, o en China y la India, empeñados todos por igual en facilitar las comunicaciones y los intercambios, trátase de transporte de carga y pasajeros, o de la difusión de ideas y conocimiento. Venezuela, indudablemente, escogió tragarse la flecha e ir a contravía, en un proceso aislacionista suicida.

Para la Facultad de Ingeniería de la ilustre Universidad de Los Andes, no debería existir una prioridad mayor que la de expandir el horizonte para ofrecerle acceso a los futuros ingenieros de Venezuela a un mundo donde las fronteras entre ingeniería y arte, entre ingeniería y ciencias básicas, entre ingeniería y economía y negocios, entre ingeniería e idiomas modernos, es cada día más tenue y simbólica. A pesar de la profunda crisis estructural venezolana, que no sólo ha destruido la economía del país sino, peor aun, su entramado social y moral, el papel fundamental de la Universidad sigue siendo el mismo que ha cumplido desde la Edad Media en Occidente: la Universidad es la casa que vence la sombra.

“The term Engineering is derived from the Latin *ingenium*, meaning “cleverness” and *ingeniare*, meaning “to contrive, devise”” (Wikipedia). Nos toca a los ingenieros de la Facultad de Ingeniería de la ULA ingeniarnos para, sin cambiar nada en lo inmediato, inducir una conmutación de estados mentales que nos permita, en el corto plazo, retomar la senda del progreso científico y tecnológico. Para ello debemos aprovechar todas las facilidades existentes en la Universidad como globalidad y nuestra capacidad profesional de diseño e implementación de soluciones. Ese es el reto que tenemos por delante, no otro. Con las propuestas hechas en este trabajo pretendo, con toda humildad, contribuir a generar una discusión que conduzca a trazar estrategias que resintonicen a nuestra Facultad con las corrientes fundamentales del desarrollo de la ingeniería a nivel mundial.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento a algunos apreciados y cercanos colegas, con quienes he venido compartiendo y discutiendo, al menos durante los últimos tres años, las ideas resumidas en este trabajo. En la Facultad de Ingeniería, mi reconocimiento a los Profesores Juan Cardillo, Mariela Cerrada y Domingo Hernández. En la Facultad de Arte, mi reconocimiento a los Profesores Raúl Hernández y Fernando Burgos. La responsabilidad por los ensueños y desvaríos es, sin embargo, toda mía.

Referencias

- Consejo Directivo del Doctorado en Ciencias Aplicadas, 2013, Reglamento del Doctorado en Ciencias Aplicadas de la Universidad de Los Andes, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Dudamel G, 2016, Gustavo Dudamel's keynote speech for recipients of the 2015 National Medal of Arts and National Humanities Medal, En <http://gustavodudamel.com/us-en/gustavo-dudamel-s-keynote-speech-for-recipients-of-the-2015-national-medal-of-arts-and-national-humanities-medal>, Washington, DC, USA.
- García V, 2003, Proyecto Programa Académico Interdisciplinario PAI, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Götze H & Wille R (Editors), 1984, Musik und Mathematik, Salzburger Musikgespräch 1984 unter Vorsitz von Herbert von Karajan, Springer-Verlag, Berlin, Alemania.
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Engineering>, Fecha de consulta: 29 Septiembre 2016.
- https://es.wikipedia.org/wiki/Iannis_Xenakis, Fecha de consulta: 30 Septiembre 2016.
- [https://es.wikipedia.org/wiki/John_Williams_\(compositor\)](https://es.wikipedia.org/wiki/John_Williams_(compositor)), Fecha de consulta: 30 Septiembre 2016.
- Lao Zi, 2007, Tao Te Ching, Edición Multilingüe, China Religious Cultural Communication Association and Chinese Taoist Association, Beijing, China.
- Millán E, 2002, Proyecto Programa de Ampliación Curricular Interdisciplinario (PACI) de la Facultad de Ciencias, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Rodríguez-Millán J, Hernández R, 2015, Notas para una Propuesta de Apertura de Programas Académicos Experimentales Basados en Proyectos de Investigación Intra-, Multi-, Inter- y Transdisciplinarios en la Universidad de Los Andes, Documento Presentado a la Consideración del Vicerrectorado Académico, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Rodríguez-Millán J, 2016, Ciencia, Arte y Tecnología al Servicio del Modelaje Gráfico de Conceptos y Sistemas Complejos, VII Jornadas Científico-Técnicas de la Facultad de Ingeniería ULA, Mérida, Venezuela.
- Root-Bernstein R, 1992, Music, Creativity and Scientific

Thinking, Modify Article from the Keynote Address for Music and the Brain: A Symposium, Foundation for Human Potential, The Art Institute of Chicago, Chicago, USA.

Sarmento C, 2014, Interculturalism, multiculturalism, and intercultural studies: Questioning definitions and repositioning strategies, *Intercultural Pragmatics*, 11(4), 603-618, De Gruyter Mouton.

Zambrano R, 2005, Comunicación del CNU al Rector de la Universidad de Los Andes, CNU, Caracas, Venezuela.

Rodríguez-Millán, Jesús: *Ingeniero Electrónico de la USB y MSc. en Matemáticas de la UCV, Caracas, Venezuela. PhD de la Universidad Técnica de Budapest (BME), Hungría. Profesor Titular, Miembro Fundador del Grupo de Sistemas Dinámicos de la Facultad de Ingeniería y Coordinador Fundador de la Cátedra Libre CATAO: Diálogos Científico-Artístico-Tecnológicos entre Asia y Occidente, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes (ULA), Mérida. Miembro del Grupo de Investigación GAMAD de la Facultad de Arte de la ULA, Mérida, Venezuela. Cinturón Negro en Kung Fu Estilo Grulla Blanca, Escuela Superior de Kung Fu de Venezuela, Sede Mérida*

Capítulo 35

Registro de caudales y evaluación hidráulica del río la mucuy

Mogollón, David*; Sánchez, Engelber; Rivas, Francisco

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València.

Valencia, España.

*dj89mogo@gmail.com

Resumen

Conocer la capacidad hidráulica de una cuenca es necesario al momento de realizar estudios dentro de la ingeniería, específicamente en la ingeniería hidráulica. También es importante para estudios biológicos, ecológicos y geológicos. Haciendo referencia a una sección de interés, o al punto donde convergen todas las líneas de agua pertenecientes a una hoya hidrográfica, se tiene que, para conseguir el gasto en determinada sección, existen múltiples métodos experimentales de aforo. Para el presente estudio, se ubicó un punto bajo la cuenca denominada La Mucuy, la cual está conformada por cuatro subcuencas con características distintas. A su vez, la cuenca puede dividirse en dos partes: La Mucuy Alta, en la que se centra ésta investigación, y La Mucuy Baja. El estudio se basó en medir el caudal de La Mucuy Alta por medio del aforo químico, por tratarse de un río de montaña, determinando los cloruros presentes en las muestras de agua a través del método argentométrico. La curva de caudales se ajustó a lo largo de siete puntos. La ecuación utilizada para obtener la gráfica, fue validada, convirtiéndose en una línea recta a través de un análisis de regresión simple. Matemáticamente, fue posible la correlación entre las dos subcuencas en estudio, donde se pudo comprobar una clara relación entre el caudal correspondiente a cada subcuenca con respecto al caudal total. Finalmente, se estudiaron las características de estabilidad del río: para un caudal de $2.999 \text{ m}^3/\text{s}$, el río tiene una pendiente estable del 0.43 %, a la que corresponde un ancho estable de 4.06 m y una profundidad de 0.52 m, aproximadamente. Los resultados muestran que, existe una gran diferencia entre la pendiente física y la pendiente estable, indicando que, el río buscará la estabilidad, formando meandros, a fin de reducir su pendiente.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

En su necesidad de expandirse como sociedad, el hombre ha intervenido el medio ambiente, específicamente en aquellos escenarios fluviales, donde su mediación ha traído como corolario una alteración de las condiciones naturales de los cursos de agua.

Cuando estos cambios, de tipo antropogénicos, se efectúan en superficies montañosas, puede ocurrir un significativo arrastre de material grueso, como cantos rodados, que ponga en evidencia la modificación del cauce de la corriente de agua, bien sea por pendiente, ancho o profundidad. En cualquier caso, el río debe alcanzar su nueva condición de equilibrio, para lo cual es necesario, como punto de partida, estudiar una de las variables que hacen posible interpretar su estabilidad: el caudal.

El caudal puede determinarse en una sección específica. Haciendo referencia al punto donde convergen todas las líneas de agua pertenecientes a la hoya hidrográfica, se tiene que, para conseguir el gasto hidráulico, existen múltiples métodos experimentales de aforo. Sin embargo, no todas las técnicas existentes pueden aplicarse cuando se trata de un río de montaña. Debido al desorden en las líneas de flujo, el caudal de los cursos de agua por travesías montañosas, suele medirse por el llamado método químico.

El aforo químico (Diez y col., 1956), se aplica preferiblemente en los casos de ríos turbulentos y de perfil tan irregular en las secciones de aforo.

“Si en una sección del río que se quiere aforar se inyecta una solución concentrada de una sal y aguas abajo se toman muestras para determinar la concentración del río en la misma sal, es posible calcular el gasto del río mediante una fórmula sencilla en que intervienen únicamente la concentración de la solución inyectada aguas arriba, la concentración del río aguas abajo y el gasto de la solución concentrada, que se supone inyectada mediante un dispositivo de gasto constante” (op. cit.).

La presente investigación tiene como objetivo central definir una curva de caudales en un punto ubicado bajo la cuenca La Mucuy, para posteriormente establecer las características de estabilidad del río. La cuenca está formada por cuatro subcuencas con características distintas. A su vez, la cuenca puede dividirse en dos partes: La Mucuy Alta y La Mucuy Baja, ambas con dos quebradas principales.

El estudio se basó en medir el caudal de La Mucuy Alta por medio del aforo químico, para lo cual se fijó un punto aguas abajo de donde finaliza esta parte superior de la cuenca. El procedimiento consiste en determinar los cloruros presentes en las muestras de agua a través del método argentométrico.

Las dos corrientes principales de agua en La Mucuy Alta son denominadas El Loro y La Coromoto y se encuentran exactamente donde comienza la entrada al parque La Mucuy. Estos dos afluentes parecen presentar una capacidad hidráulica semejante, sin embargo, es necesario un estudio más detallado, a fin de definir el comportamiento de

cada una de ellas y su aporte a la cuenca en general. La presencia de fuertes pendientes y materiales de gran tamaño como gravas y cantos rodados se hacen notar en cada una de las subcuencas.

En los últimos años la quebrada ha presentado cambios de comportamiento bruscos, registrando máximas crecidas para un año de medición, aproximadamente de 15 m³/s, es decir, 33 veces superior a su caudal más bajo, 0.45 m³/s, para ese mismo año. (C.I.D.I.A.T., 2006).

Por tal motivo, es imprescindible un estudio de las características de estabilidad del cauce, introduciendo para ello la teoría de régimen. En los ríos de montaña se recomienda utilizar el método de Altunin (Flórez y col., 2006).

2 Marco Teórico

2.1 Cuenca Hidrográfica

Una cuenca u hoya hidrográfica (Sheng 1992), es una zona delimitada topográficamente que desagua mediante un sistema fluvial, es decir, la superficie total de tierras que desaguan en un cierto punto de un curso de agua o río.

Por su sistema de drenaje y conducción final, las cuencas pueden ser (Faustino y col., 2000): arréicas, cuando no logran drenar a un río, mar o lago y sus aguas se pierden por evaporación o infiltración sin llegar a formar escurrimiento; criptorréicas, cuando su red de drenaje no tiene un sistema organizado y sus aguas corren como ríos subterráneos; endorréicas, cuando sus aguas llegan a un embalse o lago sin alcanzar el mar; exorréicas, cuando las vertientes conducen las aguas a un sistema mayor de drenaje como un gran río o mar.

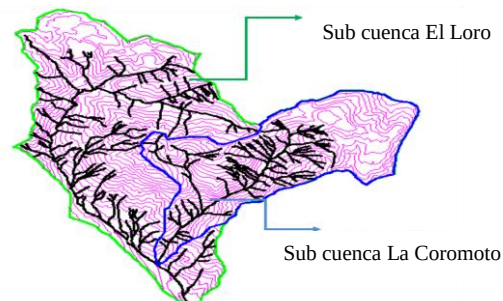


Fig. 1. Cuenca exorréica La Mucuy Alta

En cuanto a las características físicas de una cuenca hidrográfica (González, 2003) pueden mencionarse:

- Área: Es la proyección horizontal de la superficie encerrada por la divisoria de la cuenca vertiente en el punto considerado.
- Índice de Gravelius (K_{cc}): se define como el cociente entre el perímetro de la cuenca y el perímetro del círculo de superficie equivalente. Este parámetro cuantifica la forma de la cuenca.

$$K_{cc} = \frac{\text{Perímetro de la cuenca}}{2 \sqrt{\frac{\text{Área de la Cuenca}}{\pi}}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

- Factor de forma (K_f): es la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la cuenca. Este parámetro puede indicar la vulnerabilidad a crecientes en la cuenca.

$$K_f = \frac{B}{L} = \frac{A}{L^2}$$

(Ecuación 2)

Donde L es la longitud del cauce principal, A y B son el área y el ancho promedio de la cuenca respectivamente.

- Densidad de drenaje (D_d): Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca, L_t , y el área de la cuenca, A. Este valor indica la capacidad de drenaje de la cuenca en km/km^2 .

$$D_d = \frac{L_t}{A}$$

(Ecuación 3)

- Extensión media de la escorrentía superficial (l): Es la distancia media en la que, el agua de lluvia tendría que escurrir sobre los terrenos de la cuenca en el caso de que la escorrentía se diese en línea recta desde el punto de caída de la lluvia hasta el curso de agua más cercano.

$$l = \frac{A}{L_t}$$

(Ecuación 4)

- Sinuosidad de las corrientes (S): Es la relación entre la longitud del río principal, medida a lo largo del cauce, L, y la longitud del valle en línea recta o curva, L_v .

$$S = \frac{L}{L_v}$$

(Ecuación 5)

Tabla 1. Características físicas de las sub-cuencas que forman La Mucuy Alta

Sub cuenca	El Loro	La Coromoto
K_c	1.54	1.59
K_f	0.33	0.36
D_d (Km/Km^2)	2.29	2.4
S	1.34	0.998

Las tablas 1 y 2 corresponden a las características físicas de la cuenca en estudio.

Tabla 2. Sistema de drenaje y factores de forma de La Mucuy Alta

Sub cuenca	El Loro	La Coromoto
Perímetro (Km)	35.28	29.05
Área (Km^2)	41.94	27.75
Longitud axial (Km)	11.25	8.8
Longitud del cauce principal (Km)	15.42	9.1
Longitud del valle (Km)	11.49	9.12
Longitud total de los cursos de agua (Km)	95.99	66.56

El perfil longitudinal del río es la línea que relaciona la altura del cauce con la distancia a su nacimiento. La relación entre la altura y la longitud de un río, da idea de sus características hidrodinámicas (erosión, transporte de sedimentos, etc.) y sus posibilidades energéticas y de aprovechamiento. También se debe conocer la pendiente del cauce principal, existiendo el método de la pendiente media, la pendiente ponderada y la pendiente equivalente constante, S_3 , que es la pendiente de un canal de sección transversal uniforme de la misma longitud del cauce principal y que posee la misma velocidad media o tiempo de recorrido que el cauce principal. Éste método (ecuación 6), es el más recomendado ya que toma en cuenta las distintas pendientes del cauce principal en el tramo en estudio (op. cit.).

$$S_3 = \left[\frac{\sum_1^N L_i}{\sum_1^n \frac{L_i}{S_i}} \right]^2$$

(Ecuación 6)

Donde L es la longitud del cauce principal (km), L_i son las longitudes de los n tramos del cauce principal considerados y S_i son las pendientes de dichos tramos.

El perfil longitudinal de la quebrada La Coromoto y El Loro se muestran en las figuras 2 y 3 respectivamente.

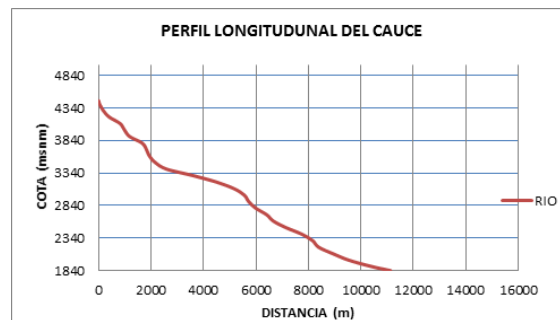


Fig. 2. Perfil longitudinal de la quebrada La Coromoto

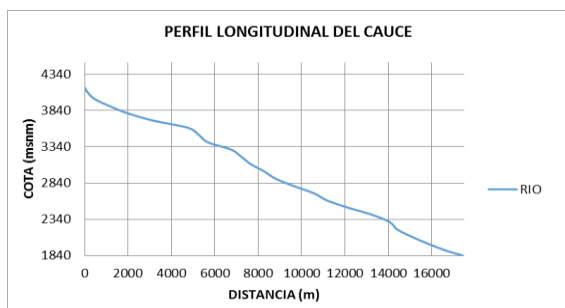


Fig. 3. Perfil longitudinal de la quebrada El Loro

Siguiendo el procedimiento de la pendiente equivalente constante y aplicando la ecuación 6, la sub-cuenca La Comomoto tiene una pendiente S_3 de 17.90% y la sub-cuenca El Loro una pendiente S_3 de 11.70%

2.2 Aforo de un río

Aforar significa (Bateman 2007), medir el caudal que fluye por una sección determinada a través de medidas realizadas en el cauce.

Las mediciones de caudal (Ramírez 1999), se conocen como mediciones fluviométricas o hidrométricas y son consideradas más reales que las de precipitación; ya que, las mediciones de caudal representan el escurrimiento total de una cuenca, mientras que las mediciones de precipitación sólo reflejan una muestra puntual de la lluvia sobre un área extensa.

Para aforar ríos de montaña con poco caudal y velocidades elevadas, se aplica el aforo químico, el cual consiste en inyectar un caudal constante Q_1 de una solución salina de concentración C_1 conocida y aguas abajo se mide la concentración C_2 , a una distancia no menor de 200 m para que así garantice una mezcla homogénea, ni mayor de 400 m, debido a que el trazador empleado tiende a diluirse a grandes distancias y entonces no sería posible determinar con exactitud las concentraciones (op. cit.).

También es necesario establecer la concentración de sal inicialmente presente en el río, C_0 . Si ésta fuera excesivamente elevada, debe cambiarse la sustancia trazadora. Aplicando el principio de conservación de masa, se tiene: $Q_0 * C_0 + Q_1 * C_1 = (Q_0 + Q_1) C_2$. De donde,

$$Q_0 = Q_1 \times \frac{(C_1 - C_2)}{(C_2 - C_0)} \quad (\text{Ecuación 7})$$

El aforo químico (Rocha 2001), establece un régimen permanente de caudal, de la disolución concentrada sobre el caudal del río, donde la sustancia empleada como trazador se diluye en gran medida, generando una nube de concentración que corre río abajo. Esta nube de concentración puede ser una nube elemental, constituida por una inyección instantánea y puntual en el centro de un estanque profundo de aguas claras, donde generalmente los movimientos existentes son provocados por la expansión natural de la nube,

que se extenderá en forma similar a semiesferas concéntricas cortadas por la superficie y hacia el fondo. En estos círculos, la intensidad del color irá siendo cada vez más débil por causa de la dispersión, hasta que finalmente ante la sensibilidad visual desaparezca.

Al momento de aplicar las fórmulas de aforo químico, es preciso que la profundidad sea lo suficientemente pequeña como para poder admitir que en el sentido vertical las concentraciones se mantienen constantes. En cualquier otro caso de aguas profundas se produciría una absorción de sales disueltas que romperían las condiciones de continuidad que se han de aplicar a lo largo del río.

El trazador se inyecta en una sección dada con un caudal constante y una concentración C_1 , tal como se indica en la figura 4 y donde se supone que el flujo es permanente.

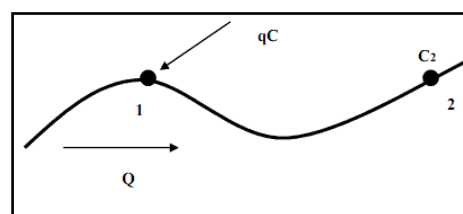


Fig. 4. Inyección a caudal constante

Tabla 3. Valores recomendados para caudales y concentraciones en el método de aforo químico

Q del río (m³/s)	Q inyección (L/s)	Concentración (g/L)
< 15	0.1	125
15 < Q < 60	0.1	250
60 < Q < 100	0.3	250

En la Tabla 3 se presentan las concentraciones y caudales de inyección recomendados.

2.3 Trazador

Puede definirse como trazador (Salcedo 2008), a toda sustancia que, incorporada a un proceso físico o químico, permite estudiar su comportamiento y evolución. Entre los trazadores empleados pueden citarse: los sólidos en suspensión, los trazadores químicos solubles en el medio bajo estudio, los colorantes y los elementos radioactivos.

El trazador empleado en esta investigación fue el cloruro de sodio NaCl. Este se inyecta en la corriente, y su detección "in situ" por el método de conductividad es relativamente sencillo.

2.4 Selección de emplazamiento de la sección de aforo

La condición fundamental que se debe cumplir para el emplazamiento de éste tipo de aforo es que se produzca una mezcla homogénea de la solución inyectada en el agua de la corriente en un tramo relativamente corto. La mezcla necesita verse mejorada por las rugosidades del canal y la presencia de cantos rodados que aumentan la turbulencia de la

corriente, tales como cascadas y estrangulamientos abruptos del curso del agua.

2.5 Determinacion de cloruros

El procedimiento de ensayo ha sido normalizado por la NMX-AA-073-1981 a través de la determinación argentométrica de los cloruros, la cual se basa en la formación de cromato de plata de color rojizo; esto ocurre cuando se adicionan al agua iones de cromato como indicador, e iones de plata como reactivo precipitante. El mecanismo consiste en titular con una solución valorada de nitrato de plata, determinando la cantidad necesaria para precipitar todos los cloruros como cloruros de plata, e inmediatamente se observa la formación de cromato de plata de color rojizo y en ese momento se anota el volumen de solución de nitrato de plata utilizado y se calcula la concentración de cloruros existentes en el agua.

Una vez finalizado el ensayo se procede a determinar la concentración de cloruros en el agua, expresada mg/L, aplicando la fórmula que se muestra a continuación:

$$mg\ Cl/L = \frac{(A-B)*N*35450}{ml_{muestra}} \quad (\text{Ecuación 8})$$

En donde:

A: ml del titulante gastado en la titulación de la muestra

B: ml del titulante gastado en la titulación del blanco

N: normalidad del titulante, $AgNO_3$

2.6 Estabilidad de cauces

- **Concepto de la teoría de régimen:** El flujo uniforme en canales de contornos constituidos por partículas sueltas se describe mediante tres ecuaciones independientes. Es decir, un canal abierto de contorno suelto tiene tres grados de libertad y se le incluye un cuarto grado y es la capacidad de formar meandros. Generalmente, un sistema tardará más en alcanzar el equilibrio en cuanto mayor sea el grado de libertad que tenga, éste concepto se define en hidráulica fluvial como Régimen. (Maza y col., 1996).

La teoría de régimen (Rivas 1999) tiene aplicación en el diseño y construcción de canales sin revestir y en la predicción de cambios en la pendiente y/o en la geometría de un río cuando alguna de sus características o afluentes cambien.

- **Grados de Libertad:** Son las posibilidades de movimientos de un cauce. En flujos con un grado de libertad no hay transporte de sedimentos, el ancho es fijo y solo puede cambiar la profundidad con la variación del caudal. En los flujos con dos grados de libertad, se presenta transporte de sedimentos y tanto la profundidad como la pendiente pueden variar. Por lo tanto, son necesarias dos ecuaciones.

En los flujos con tres grados de libertad, el material de los márgenes es erosionable, por lo tanto, además del transporte de material, la profundidad, la pendiente y el ancho pueden variar. Son necesarias tres ecuaciones para definir las características. (Gómez 2014).

Se debe tomar en cuenta el cuarto grado de libertad, ya que un río tiende a formar meandros cuando su pendiente de estabilidad es menor que la pendiente general del valle.

- **Caudal formativo (Q_f):** Es aquel que se presenta con mucha frecuencia en el río, normalmente existen dos formas para definir este caudal: caudal correspondiente a un periodo de retorno de 1.4 años y caudal máximo a sección llena. (Martín 2002).

La Mucuy presenta un diámetro medio del material del fondo de 57 mm (Rivas 1999).

3 Procedimiento Experimental

3.1 Caudal inyectado de concentración C_1

El recipiente para mezclar la concentración C_1 tiene un volumen de 130 litros, para lo cual es necesario determinar el caudal promedio de la bomba con ¼ HP de potencia. Aplicando el método volumétrico se obtuvo que:

Caudal de inyección = 0.40 lt/s

Donde,

Volumen del recipiente de prueba = 10 Lts

Tiempo empleado = 25 seg.

3.2 Cantidad de trazador en cada aforo

De la tabla 3 y para un caudal < 15 m³/seg, utilizar concentración = 125 gr/lt

$NaCl = 130\ lt \times 0.125\ Kg/lt = 16.3\ Kg$

Finalmente, la cantidad de NaCl empleada para cada aforo es de 16.5 Kg.

3.3 Toma de las muestras en campo\

Se preparó la solución indicadora (colorante vegetal para ropa + agua).

Se tomó una muestra de agua en el río para la concentración inicial C_0 y una muestra del recipiente que contiene la solución salina para la concentración C_1 .

Se comienza entonces a inyectar el caudal de concentración salina y simultáneamente se arroja el indicador al río.

Aguas abajo se toman las 3 muestras, para la concentración C_2 , en el momento justo en que el indicador está atravesando el punto de toma.

A continuación se mide la altura de agua, teniendo presente el efecto del oleaje.

3.4 Determinación de cloruros en el agua

Para determinar los contenidos de cloruros presentes en las muestras de agua con distintas concentraciones, se

empleó el método argentométrico a través de las siguientes etapas:

Se estandariza el nitrato de plata con una solución estándar de cloruro de sodio, aplicando la siguiente ecuación

$$\text{AgNO}_3 = \frac{N_1 \times V_1}{V_2} = \frac{0.02 \text{ N} \times 50 \text{ ml}}{50 \text{ ml}} = 0.02 \text{ N}$$

Donde, V_1 es el volumen de solución estándar de cloruro de sodio y V_2 el volumen de nitrato de plata empleado en la titulación.

Se obtiene la concentración de cloruros presentes en el agua por medio de la ecuación 8, tomando en cuenta que el pH de las muestras debe permanecer entre 7 y 10. Los siguientes datos corresponden al primer aforo

$$\text{Ac}_0 = 0.85 \text{ mL}$$

$$\text{Ac}_1 = 1.0 \text{ mL}$$

$$\text{Ac}_2^{(1)} = 1.0 \text{ mL}$$

$$\text{Ac}_2^{(2)} = 1.2 \text{ mL}$$

$$\text{Ac}_2^{(3)} = 1.0 \text{ mL}$$

$$\text{mg}(\text{Cl}^-/\text{L})\{\text{C}_0\} = \frac{(0.85 \text{ ml} - 0.80 \text{ ml}) \times 0.02 \text{ N} \times 35450}{50 \text{ ml}}$$

$$\text{mg}(\text{Cl}^-/\text{L})\{\text{C}_0\} = 0.71 \text{ mg/L}$$

$$\text{mg}(\text{Cl}^-/\text{L})\{\text{C}_1\} = 2.84 \text{ mg/L} \times 10000 = 28400 \text{ mg/L}$$

$$\text{mg}(\text{Cl}^-/\text{L})\{\text{C}_2^{(1)}\} = 2.84 \text{ mg/L}$$

$$\text{mg}(\text{Cl}^-/\text{L})\{\text{C}_2^{(2)}\} = 5.67 \text{ mg/L}$$

$$\text{mg}(\text{Cl}^-/\text{L})\{\text{C}_2^{(3)}\} = 2.84 \text{ mg/L}$$

$$\text{mg}(\text{Cl}^-/\text{L})\{\text{C}_2^{\text{promedio}}\} = 3.78 \text{ mg/L}$$

Cálculo del caudal: aplicando la ecuación 7, se obtiene

$$Q = 3699.83 \text{ lts/s} = 3.70 \text{ m}^3/\text{s}$$

En la tabla 4 se resume el resultado de los caudales obtenidos por el método del aforo diluido o químico con su respectiva medida de altura de agua.

Características de estabilidad del río

Aplicando el método de Altunin, se pueden seguir los siguientes pasos:

Estimar el caudal formativo asumiendo un caudal medio que se consideró normal, entre aquellos medidos en el río, y fue de 2.999 m³/seg al que le corresponde una profundidad normal de 53 cm

Al suponer el orden de magnitud de la profundidad normal $Y_n \leq 1.50 \text{ m}$, se definió que el valor del coeficiente α es 1/3.

Tabla 4. Altura de agua y caudales obtenidos

Caudal (Lt/s)	Altura (cm)	Mes del aforo
3700	58	Julio
3160	55	Septiembre
2878	50	Octubre
2999	53	Noviembre
3411	56	Diciembre
1224	41	Enero
498	35	Febrero

En base al diámetro medio del material de fondo, y según la tabla de velocidades máximas no erosionables, se obtuvo que $V\phi = 1.605 \text{ m/s}$.

Se calcula el exponente E, necesario para conocer la pendiente de estabilidad, mediante la ecuación

$$E = 0.2(z - \alpha) + x * (\alpha + 1)$$

Para lo cual $z=1/2$ y $x=1/3$

$$E = 0.48$$

$$S = \left(\frac{V\phi^{\left(\frac{5+2*\alpha}{4}\right)*a^{\frac{3}{2}}}}{11^{(\alpha+1)*Q^{\left(\frac{0.5-\alpha}{2}\right)}}} \right)^{\frac{1}{E}}$$

La pendiente de estabilidad se obtiene mediante una ecuación propuesta por el autor del método, en donde al sustituir ciertos valores nos queda que

Para ríos de montaña el método recomienda tomar $a = 1$, por lo tanto, la pendiente de estabilidad es $S = 0.0043$

- Se calcula la profundidad normal de estabilidad en el cauce y se comprueba la hipótesis establecida inicialmente.

$$Y_n = \left(\frac{a * V\phi}{Cr * S^x} \right)^{\frac{1}{z-\alpha}}$$

Ecuación en la que Altunin propone $Cr=11$. Por lo tanto, $Y_n = 0.52 \text{ m}$.

- Al comprobar la profundidad normal, se determina finalmente el ancho estable T

$$T = \frac{A * Q^{0.5}}{S^{0.2}}$$

Donde $A = \frac{1}{\sqrt{V\phi}} = 1.605 \text{ m/s}$. Por lo tanto, $T = 4.06 \text{ m}$.

La tabla 5 resume las dimensiones actuales y estables, estableciendo una comparación entre ellas en cuanto a estabilidad.

Tabla 5. Resumen de la estabilidad del río La Mucuy según Altunin

Parámetro	Condición actual	Condición estable	¿Tiene estabilidad?
Profundidad (m)	0.53	0.52	Si
Ancho (m)	4	4.06	Si
Pendiente (%)	11.7 y 17.9	0.43	No

4 Análisis de resultados

4.1 Características físicas de la cuenca

El índice de Gravelius indica un mayor alargamiento en la forma de la cuenca, es decir un ensanchamiento en el extremo superior, tal como se indica en la figura 1.

El factor de forma define a la cuenca como ligeramente alargada.

La densidad de drenaje se encuentra más cercana a 3 Km/Km² que a 1 Km/Km², por lo tanto, la cuenca presenta un buen drenaje.

Para el perfil longitudinal de la quebrada La Coromoto y El Loro, que se muestran en la figura 2 y 3 respectivamente, se puede notar que la quebrada La Coromoto tiene una pendiente pronunciada y poco uniforme en un gran porcentaje de su longitud, a diferencia de la quebrada El Loro que presenta un perfil longitudinal menos pronunciado.

Se refleja, según la ecuación 6, una diferencia considerable entre las pendientes, lo que podría generar que los dos cauces tengan un comportamiento hidráulico diferente.

El índice de sinuosidad de las corrientes, según la ecuación 5, presenta una diferencia significativa entre las dos subcuencas. Lo que indica que el cauce principal de La Coromoto presenta un trayecto mucho más recto que el de El Loro. Este parámetro también da una medida de la velocidad del agua en el cauce, siendo así mayor la velocidad del agua en el cauce principal de la quebrada La Coromoto.

4.2 Curva de caudales y su correspondiente ajuste por medio de un análisis de regresión lineal simple

El tipo de modelo o función matemática que relaciona las dos variables puede ser, en principio, cualquiera, pero una vez graficados los puntos se observa que la función potencial mostrada en la figura 5, es la más adecuada, ya que cuando el nivel del agua sea cero el caudal debe ser nulo.

Una vez ajustada la curva se debe validar el modelo matemático obtenido, ya que es una ecuación no lineal, se realiza una transformación para relacionar las dos variables de la forma siguiente:

$$Y = \beta_0 * X^{\beta_1}$$

Este modelo se transforma en una función lineal para así poder aplicar el análisis de regresión lineal simple, mediante una transformación logarítmica de la forma:

$$\log Y = \log \beta_0 + \beta_1 \log X$$

Aplicando el método de mínimos cuadrados, se estimaron los coeficientes β_0 y β_1 garantizando que la línea resultante represente de la mejor manera posible las dos variables en estudio. En la tabla 6 se presenta un resumen de los cálculos necesarios para resolver las ecuaciones normales.

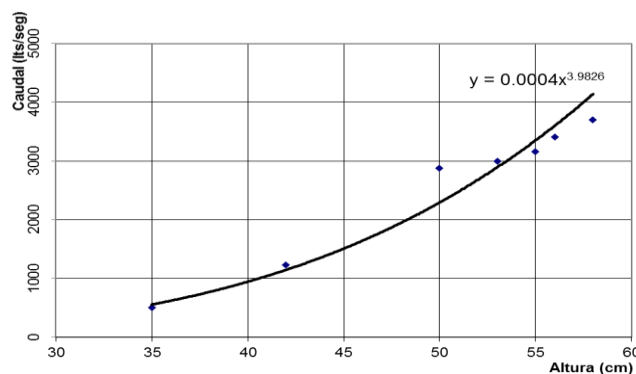


Fig. 5. Curva de caudales

Tabla 6. Tabla resumen de las ecuaciones normales

H (cm)	Q (lts/s)	X=log H	Y=log Q	X ²	XY
58	3700	1.7634	3.5682	3.109678288	6.292266807
55	3160	1.7404	3.4997	3.028862291	6.090724823
50	2878	1.699	3.4591	2.886499076	5.876891494
53	2999	1.7243	3.477	2.973127274	5.995266619
56	3411	1.7482	3.5329	3.056161378	6.176141523
42	1224	1.6232	3.0878	2.634938259	5.012238995
35	498	1.5441	2.6972	2.384146126	4.164705636
	Σ=	11.8425	23.3218	20.07341269	39.6082359
	Media=	1.6918	3.33	3.109678288	6.292266807

$$\beta_1 = \frac{7 * 39.6082359 - 23.3218 * 11.8425}{7 * 20.07341269 - 11.8425^2}$$

$$\beta_1 = 3.9826$$

$$\beta_0 = 0.0004$$

Para la validación del modelo se trabajó con un nivel de confianza del 95%, ya que en ingeniería no se recomiendan valores menores. Posteriormente se procedió a determinar, con los datos incluidos en la tabla 7, el coeficiente de determinación R^2 , que es un primer parámetro que suele utilizarse para juzgar la validez del modelo de regresión lineal. Es importante hacer notar que este coeficiente corresponde al ajuste lineal de los logaritmos.

Tabla 7. Datos para la validación del ajuste

$Y=\log Q$	Y estimado	$(Y-Y_{est})^2$	$(Y-Y_{med})^2$	Error %	ε	D
3.5682	3.617	0	0.06	-1.37	-0.05	-0.85
3.4997	3.5251	0	0.03	-0.73	-0.03	-0.44
3.4591	3.3603	0.01	0.02	2.86	0.1	1.72
3.477	3.4611	0	0.02	0.46	0.02	0.28
3.5329	3.5563	0	0.04	-0.66	-0.02	-0.41
3.0878	3.0587	0	0.06	0.94	0.03	0.5
2.6972	2.7434	0.01	0.4	-1.71	-0.05	-0.8
	$\Sigma=$	0.02	0.62			

$$R^2 = 1 - \frac{0.02}{0.62} = 0.97$$

El segundo parámetro es la varianza del modelo que se determina por medio de:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{7-2} * 0.2 = 0.004$$

Una vez determinados los residuos estandarizados y teniendo en cuenta que los errores se ajustan a una distribución normal, estos residuos deben caer en el intervalo (-2, +2), cualquier dato que se encuentre fuera de este rango se considera un valor atípico. Es importante resaltar que para la curva de gastos del cauce en estudio no existen valores que se puedan considerar atípicos.

Otra forma de validar el modelo es graficar el error contra el valor estimado Y_i , figura 6. En este caso, lo ideal es que no se presente ningún patrón definido.

Además, es conveniente resaltar que en este análisis se rechaza la hipótesis nula ($H_0: \beta_0=0$), lo que significa que el caudal si está relacionado con la altura del nivel del agua, por medio de la ecuación:

$Q = 0.0004H^{3.9826}$, Donde el caudal (Q) es en litros por segundo y la altura del nivel del agua (H) en centímetros.

4.3 Correlación de los caudales de La Coromoto y El Loro, por medio de un análisis de regresión lineal simple, usando el método de mínimos cuadrados.

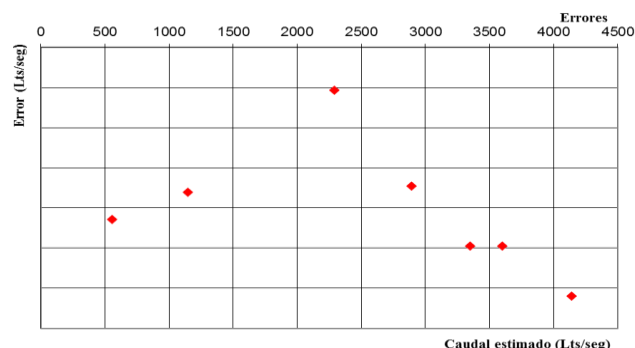


Fig. 6. Error Vs. Caudal estimado

Para el siguiente análisis se utilizaron datos de un registro de caudales históricos correspondientes a cada una de las sub cuencas bajo estudio (C.I.D.I.A.T., 2006), reflejados en la figura 7. Se buscó establecer el grado de correlación existente entre los caudales de las dos sub cuencas, a fin de obtener una ecuación que permita estimar el caudal de la sub cuenca El Loro en función del caudal de la quebrada La Coromoto.

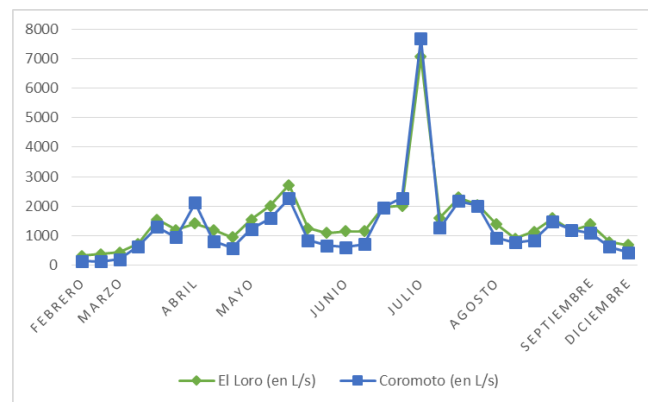


Fig. 7. Correlación Caudal La Coromoto y El Loro Vs. tiempo

En general, se observa que el caudal de la quebrada El Loro es el dominante, debido a que ésta sub cuenca presenta un área mayor. El modelo matemático obtenido es el siguiente:

$$Y = 0.8737 * X + 378.49$$

Donde Y, es el caudal correspondiente a la quebrada El Loro y X, el caudal correspondiente a la quebrada La Coromoto. Esta ecuación indica que cuando el 13% del caudal de La Coromoto es mayor a 378.49, la tendencia en el incremento del caudal se invierte, es decir, el caudal de la quebrada La Coromoto tiende a ser superior a la de El Loro.

Esto ocurre con caudales elevados, lo que coincide con la tendencia presentada en los datos originales, ya que en este caso la quebrada dominante es La Coromoto. En la figura 8 se muestra el ajuste a una ecuación lineal.

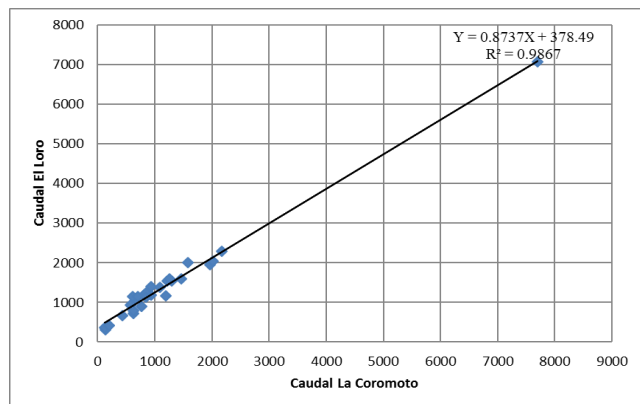


Fig. 8. Correlacion lineal Caudal La Coromoto Vs Caudal El Loro

La ecuación matemática fue evaluada por medio del método de mínimos cuadrados obteniendo resultados muy satisfactorios ya que el coeficiente de determinación es de 0.9867, valor muy cercano a la unidad, lo que refleja una clara relación de caudales entre las dos quebradas.

En la figura 9 se muestra el gráfico de error contra valor estimado, para intentar establecer una mayor confianza del modelo.

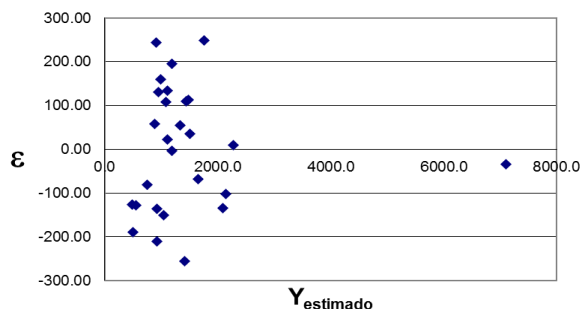


Fig. 9. Error Vs. $Y_{estimado}$

El gráfico de error contra valor estimado presenta una tendencia completamente aleatoria, es decir los puntos deben formar una mancha tal como observa en la figura 9, indicando una mayor confianza del modelo.

4.4 Correlación de los caudales de El Loro y el caudal total.

Se buscó establecer la correlación entre los caudales correspondientes a cada sub cuenca y el caudal total. Comenzando con la sub cuenca El Loro, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$Y = 0.4673 * X + 197.87$$

Donde Y es el caudal correspondiente a la quebrada El Loro y X el caudal total. Esta ecuación permite estimar el caudal total con solo tener como información el caudal en la sub cuenca El Loro. El caudal de El Loro debe ser menor al caudal total en todo momento, o igual al caudal total, en el caso hipotético que la quebrada La Coromoto quede seca, es por ello que, para valores bajos de caudales, menores a 350 lts/seg del caudal total, la ecuación no es confiable.

La figura 10 muestra el ajuste a una ecuación lineal, validada por medio del método de mínimos cuadrados obteniendo como resultado un valor del coeficiente de determinación de 0.996, sin que se detectara presencia de valores atípicos, además de rechazar la hipótesis nula, lo que verifica un excelente ajuste para estas dos variables.

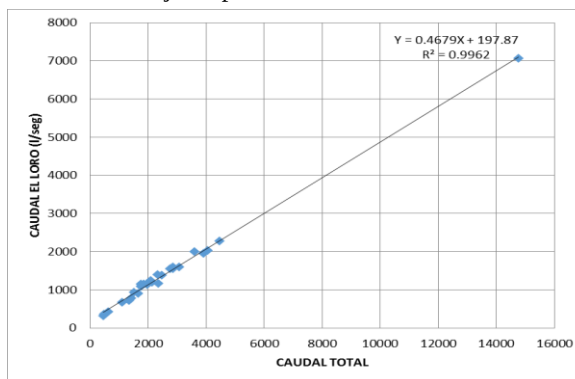


Fig. 10. Correlacion lineal Caudal total Vs Caudal El Loro

4.5 Correlación de los caudales de La Coromoto y el caudal total.

Al correlacionar los caudales correspondientes a la quebrada La Coromoto contra el caudal total, se obtuvo como resultado la siguiente ecuación:

$$Y = 0.5321 * X - 197.87$$

En este caso Y sería el caudal correspondiente a la sub cuenca La Coromoto y X el caudal total. Esta ecuación es más representativa que la anterior ya que en ningún momento en caudal de la quebrada La Coromoto sería mayor al caudal total (suma del caudal de las dos sub cuencas). En la figura 11 se presenta dicho ajuste.

Este último ajuste también fue verificado por medio del método de mínimos cuadrados obteniendo resultados muy satisfactorios, ya que se rechazó la hipótesis nula, no se encontraron valores anómalos y se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.997, lo que indica un ajuste casi perfecto.

4.6 Características de estabilidad

Al analizar los resultados presentados en la tabla 5 se

observa que, si bien la profundidad y el ancho del cauce coinciden con los valores de estabilidad, existe una gran diferencia en cuanto a la pendiente física y la pendiente estable. Esto indica que el río buscará la estabilidad formando meandros a fin de reducir la pendiente.

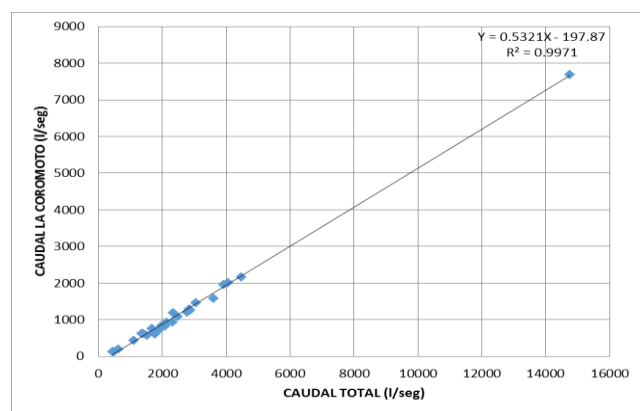


Fig. 11. Correlación lineal Caudal total Vs Caudal La Coromoto

Esto coincide con la información recogida en campo, ya que, según las declaraciones de algunos pobladores, el río ha presentado crecidas torrenciales en los últimos veinte años, durante las cuales se ha desviado del cauce principal.

5 Conclusiones

Los caudales se midieron mediante el método químico, ya que se demostró que es el método más adecuado para realizar aforos en ríos de montaña. Las fuertes pendientes y las macro rugosidades presentes en el fondo garantizan una mezcla adecuada de la solución salina, tal como lo indica la visualización del trazador. Además, el método ahorra la necesidad de estimar el radio hidráulico, cosa que en ríos de montaña resulta casi imposible. Por otra parte, y aunque solo se pudieron definir siete puntos en la curva de gastos, se lograron medir caudales correspondientes tanto a invierno como a verano, con lo cual se cubre razonablemente bien los dos extremos de dicha curva de gastos.

También se ha demostrado que, el empleo de los tintes vegetales del tipo Wiki-Wiki, es perfectamente válido en este método, ya que son inofensivos para el ambiente y resultan muy eficientes como indicadores, además de ser mucho más económicos que cualquier otra sustancia.

Al momento de determinar la cantidad de cloruros presente en las muestras, se aplicó el método argentométrico, ya que existe muy poco transporte de sedimentos en suspensión, lo que resulta ventajoso, puesto que, en dicho método se utilizan reactivos de mayor accesibilidad.

Se encontró la ecuación de la curva de gastos para el río La Mucuy, en la estación de aforos seleccionada $Q = 0.0004H^{3.9826}$, donde Q es el caudal expresado en litros por segundo y H es la altura de agua en centímetros. Dicha

ecuación presentó un coeficiente de determinación de 0.93. Además, se validó el modelo realizando la prueba de hipótesis respectiva y analizando los errores, por lo que se puede afirmar que la ecuación es confiable, pudiendo estimar así el caudal con tan solo medir el nivel del agua en el punto fijado.

Se verificó la validez del ajuste de todas las ecuaciones por medio del método de los mínimos cuadrados, obteniéndose valores altos del coeficiente de determinación en todos los casos. Estas ecuaciones permitirán, conocido el caudal de una de las sub cuencas, estimar el de la otra sub cuenca, o en función del caudal total encontrar el individual.

Se estudiaron las características de estabilidad del cauce para un caudal formativo, estimado, de 2.999m³/seg, y su correspondiente profundidad normal de 53 cm, obteniéndose así una profundidad estable de 0.52 m, un ancho estable de 4.06 m y una pendiente estable de 0.43%. En base a estos resultados, se puede concluir que, tanto en el ancho como en la profundidad, las condiciones reales coinciden con las de estabilidad del cauce, pero esto no sucede con la pendiente de estabilidad, ya que ésta resultó ser muy inferior a la pendiente real del cauce. Esto implica, sin duda alguna, que el río va a presentar tendencia a formar meandros en un futuro, a fin de ajustar la pendiente topográfica a la pendiente de condición estable. Este análisis debería tomarse en cuenta a la hora de estudiar la seguridad de la comunidad perteneciente a las adyacencias del río, sobre todo, en aquellas casas ubicadas en las laderas del cauce, porque tarde o temprano el río buscará su estabilidad, posiblemente con la erosión lateral o con la formación de meandros, ya que el material del fondo es muy grueso y probablemente no permite mayor socavación.

Referencias

- Bateman A, 2007, Hidrología básica y aplicada, GITS UPC, Barcelona, España.
- CIDIAT 2006, Aforos semanales generados por el método de aforo directo o de dilución química para el río La Mucuy Alta, Universidad de Los Andes, Mérida.
- Diez L, Campero M, 1956, Aforo químico de ríos, IDIEM, pp. 150-167.
- Faustino J, Jiménez F, 2000, Manejo de cuencas hidrográficas, Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza, Área de cuencas y sistemas agroforestales, Turrialba, Costa Rica.
- Flórez I, Aguirre J, 2006, Hidráulica fluvial, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Gómez CA, 2014, Introducción a la Hidráulica fluvial, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia.
- González, A, 2003, Apuntes de Hidrología, 2º curso de Ingeniería técnica en obras públicas, Universidad del país Vasco, pp. 19.
- Martín JP, 2002, Ingeniería de ríos, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.

NMX-AA-073-1981, Norma Mexicana de Análisis de agua, determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

Ramírez M, 1999, Hidrología aplicada, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Rivas FM, 1999, Estudio de anchos estables en ríos de montaña, Tesis para optar al grado de Magister Scientiae en Obras hidráulicas, Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, Venezuela.

Rocha JC, 2001, Obras hidráulica I, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

Salcedo VX, 2008, Estudio del uso de un radiotrazador en el análisis del comportamiento dinámico del agua de inyección en un campo del oriente ecuatoriano, Tesis Ingeniero en Petróleos, Escuela Politécnica Nacional de Quito, Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos, Quito, Ecuador.

Sheng TC, 1992, Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. Estudio y planificación de cuencas hidrográficas. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Guía FAO Conservación 13/6. Roma, Italia. 185 p.

Mogollón, David: *MSc en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia. España.*

Sánchez, Engelber: *MSc en Ingeniería Vial, Profesor instructor del Departamento de Vías de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes.*

Correo electrónico: engelbers@ula.ve

Rivas, Francisco: *MSc en Desarrollo de Aguas y Tierras, Profesor adscrito al Departamento de Hidráulica y Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes. Correo electrónico: rivasf@ula.ve*

Capítulo 36

Modelo ontológico del estándar LOM extendido para la gestión de objetos de aprendizaje adaptativos**Guevara, Carlos^{1*}; Aguilar, José²**¹Centro de Investigaciones en Informática y Tecnologías de la Computación, Universidad de Guayana
Ciudad Guayana, CA 8050, Venezuela.²Centro de Estudios en Microelectrónica y Sistemas Distribuidos, Universidad de Los Andes
Mérida, CA 5101, Venezuela.²Escuela Politécnica Nacional, Universidad Técnica Particular de Loja, Quito, Ecuador.*carlos.guevaraf@gmail.com**Resumen**

La integración de las TIC en el campo de la educación ha generado una nueva conceptualización del proceso de enseñanza-aprendizaje, transformando los modelos de formación del estudiante, las metodologías de enseñanza, los entornos de aprendizaje, entre otros aspectos. En particular, la Internet ha impulsado el desarrollo de Objetos de Aprendizaje (OA), tanto como mecanismo para facilitar el acceso a recursos educativos, como forma de producción de nuevos recursos por la posible reutilización de los existentes. Los OA tienen como características principales la accesibilidad, la reusabilidad y la interoperabilidad. Para ello se ha venido definiendo una serie de metadatos de diferentes estándares, como el Learning Object Metadata (LOM) de la IEEE o la Iniciativa de Metadatos Dublin Core. Una evolución de los OA son los Objetos de Aprendizaje Adaptativos (OAA), definidos como OA capaces de adaptarse de forma autónoma al contexto virtual donde interactúan. El estándar LOM cubre bastante bien la descripción de los metadatos de un OA desde una perspectiva estática. Sin embargo, presenta limitaciones al abordar dinámicamente su proceso de adaptación. Por tal motivo, en este artículo se propone una extensión al estándar LOM, con la finalidad de describir los metadatos que faciliten la construcción de OAA. Específicamente, se propone una nueva categoría de metadatos del contexto, que son usados por los OAA en sus procesos adaptativos. Finalmente, basado en esta extensión, se presenta un modelo ontológico de conocimiento para los OAA, con el objeto de facilitar sus búsquedas, recuperación y adaptación.

ISBN: 978-980-11-1858-9



9 78 980 11 1858 9

1 Introducción

El desarrollo de entornos virtuales de aprendizaje ha tomado un particular interés dentro de la comunidad de científica, propiciando la incorporación de nuevas estrategias de enseñanza-aprendizaje dentro del campo de la educación. Las TIC se han convertido en un importante aliado en este proceso, contribuyendo en la transformación de los modelos de formación del estudiante, las metodologías de enseñanza y el uso de los recursos educativos. (Castañeda y col., 2012, Duque 2009, Barriga y col., 2002, Rosenberg 2001).

Los Objetos de Aprendizaje (OA), definido por (IEEE 2002) como cualquier recurso, tanto digital como no digital, que pueda ser utilizado para el aprendizaje, educación o entretenimiento; emergen como una herramienta fundamental para el acceso y producción de recursos educativos en entornos virtuales de aprendizaje. Tienen como características principales la accesibilidad, reusabilidad e interoperabilidad, lo cual les permite optimizar la generación de nuevos recursos mediante la reutilización de los existentes. Para la descripción de los OA se utilizan una serie de metadatos que han sido definidos en diferentes estándares como el LOM de la IEEE y la Iniciativa de Metadatos de Dublin Core.

Una evolución propuesta de los OA son los Objetos de Aprendizaje Adaptativos (OAA), definido básicamente como un OA capaz de adaptarse de forma autónoma al contexto virtual en donde interactúa. Guevara y col. (2016) presentan un Modelo de Objeto de Aprendizaje Adaptativo, en ese trabajo proponen incorporar una extensión al estándar LOM con el fin de facilitar la búsqueda, evaluación, recuperación y aplicación de los métodos de adaptación para un OAA. El estándar LOM cubre bastante bien la descripción de los metadatos de un OA desde una perspectiva estática. Sin embargo, presenta limitaciones al abordar dinámicamente su proceso de adaptación.

A raíz del desarrollo de la web semántica, son diversos los trabajos que se han propuestos con el fin de modelar ontológicamente los metadatos utilizados para describir Objetos de Aprendizaje, entre estos está la construcción de una ontología para la secuenciación de Objetos de Aprendizaje presentado por (Vidal y col., 2010), su ontología define un proceso de adquisición de conocimiento apoyado en el modelado de los metadatos de los OA de acuerdo al estándar IEEE-LOM, lo cual le permite clasificar y recomendar recursos de aprendizaje conforme al contexto instruccional requerido.

Otro trabajo relacionado es el de (Andrade y col., 2012) quienes diseñan una ontología para el diseño de OA organizacionales, basado en los metadatos del estándar LOM. Por su parte (Casali y col., 2013) implementan una ontología para representar los metadatos de OA también basados en el estándar LOM, hacen un mapeo entre los elementos del estándar con los elementos que componen una ontología, construyen un asistente para cargar metadatos de

OA empleando una capa intermedia para especificar las restricciones mediante un vocabulario compartido que proporciona una semántica común que puede ser empleada por cualquier aplicación que utilice metadatos de objetos de aprendizaje.

En el trabajo de (Behr y col., 2014) introducen una ontología que denominan OBAA-LEME que es una ontología OWL creada para representar todos los metadatos del estándar IEEE-LOM. Adicionalmente, proponen una extensión para facilitar la interoperatividad y adecuación de los OA al contexto educativo brasileño, permitiendo la sincronización de distintos formatos empleados en las VideoAulas.

La adaptación de contenidos educacionales basado en estilo de aprendizaje y en el nivel de motivación del alumno, es presentado por (Milošević y col., 2007), sus autores diseñan una ontología la cual se fundamenta en los metadatos SCO para OA. Botsios y col. (2009) realizan una clasificación de una serie de parámetros de adaptación con el objeto de establecer una relación entre los tipos de adaptación y los metadatos de los OA. De su revisión concluyen que hay una carencia de estandarización para la creación de sistemas educativos adaptativos basado en la web y plantean la necesidad de incorporar ciertos metadatos a los OA para facilitar su adaptación.

Existe una amplia diversidad de sistemas educativos adaptativos en entornos virtuales, donde los OA toman un rol importante. Sin embargo, las reglas que se utilizan para describir su construcción están lejos de alcanzar cierto grado de estandarización. Por tal motivo, en este artículo se detalla una propuesta para extender al estándar LOM, con la finalidad de describir los datos que faciliten la construcción de un OAA. Basado en la extensión propuesta por (Guevara y col., 2016), se presenta un modelo ontológico para la gestión de OAA, con el propósito es facilitar la búsqueda, evaluación, recuperación de métodos y aplicación de reglas que faciliten dinámicamente su adaptación OAA. En la primera parte se muestran algunos trabajos relacionados; seguidamente se abordan algunas bases teóricas que sustentan la propuesta; posteriormente se detalla la extensión del estándar LOM, describiendo los elementos que componen la categoría propuesta; luego se presenta el modelo ontológico y finalmente un caso de estudio para verificar el comportamiento del modelo.

2 Marco Teórico

2.1 Objetos de Aprendizaje y Metadatos

Un Objeto de Aprendizaje (OA) es un recurso digital multimedia reusable, que puede ser utilizado en la instrucción y aprendizaje, y emplea metadatos para su descripción (Wiley 2000, Gutierrez 2008, Menéndez y col., 2011). De la calidad del diseño de los metadatos empleados para describirlos OA va a depender en gran parte la recuperación, interoperatividad y reusabilidad de éstos.

El término de metadatos fue acuñado por Jack Myers en la década de los 60 para describir conjuntos de datos, básicamente consiste en un conjunto de atributos o elementos necesarios para describir otros datos o recursos. Entre las principales funciones de los metadatos se encuentran: resumir el significado de los datos, permitir la búsqueda, determinar si el dato es el que se necesita, prevenir ciertos usos, recuperar y usar una copia del dato, mostrar instrucciones de cómo interpretar un dato, obtener información sobre las condiciones de uso, derechos de autor, aportar información acerca de la vida del dato (Senso y col, 2003).

Para el manejo de OA se ha venido definiendo una serie de metadatos en diferentes estándares, como el Learning Object Metadata (LOM) de la IEEE o la Iniciativa de Metadatos Dublin Core. Los estándares de metadatos proporcionan un lenguaje común para normar el desarrollo y comunicación de los OA; describen y suministran propiedades e información sobre éstos, permitiendo, entre otras cosas, facilitar y optimizar su manipulación, descubrimiento y reutilización.

Dublin Core Metadata Initiative (DCMI), desarrolló un estándar para la descripción de recursos entre dominios, conocido como el Conjunto de Elementos de Metadatos Dublin Core (DCMI 2012). El conjunto de metadatos propuesto por la DCMI se presenta en la Tabla 1, consta de 15 componentes agrupados en tres categorías.

Tabla 1. Conjunto de Elementos de Metadatos de DCMI

	Categoría	Elementos	
1	Contenido	Título Descripción Tipo de recurso	ema Fuente Relación Cobertura
2	Propiedad Intelectual	Autor o Creador Colaboradores	Editor Derechos
3	Instanciación	Fecha Identificador del recurso	Formato Idioma

La IEEE a través del Learning Technology Standards Committee (LTSC), propone el estándar de metadatos para describir OA, denominado Estándar LOM (Standard for Learning Object Metadata). Consta de 80 descriptores agrupados en nueve categorías (IEEE 2002). En la Tabla 2 se muestra un resumen de las categorías definidas en este estándar.

2.2 Objeto de Aprendizaje Adaptativo

Un Objeto de Aprendizaje Adaptativo (OAA) es “un recurso digital multimedia reusable, que puede ser utilizado en la instrucción y aprendizaje, el cual contiene metadatos para su descripción, y es capaz de adaptarse al contexto” (Guevara y col., 2016). En la Fig. 1 se presenta un Modelo de OAA.

Tabla 2. Categorías del Estándar LOM

Nº	Categoría	Descripción
1	General	Esta categoría agrupa la información general que describe este objeto educativo en su conjunto.
2	Ciclo de Vida	Esta categoría describe la historia y estado actual de este objeto educativo así como aquellas entidades que han afectado su evolución.
3	Meta-Metadatos	Esta categoría describe el propio registro de metadatos (en lugar del objeto educativo descrito por el registro de metadatos).
4	Técnica	Esta categoría describe los requisitos y características técnicas de este objeto educativo.
5	Uso Educativo	Esta categoría describe las características educativas o pedagógicas fundamentales de este objeto educativo.
6	Derechos	Esta categoría describe los derechos de propiedad intelectual y las condiciones de uso aplicables a este objeto educativo.
7	Relación	Esta categoría describe las relaciones existentes, si las hubiese, entre este objeto educativo y otros.
8	Anotación	Esta categoría proporciona comentarios sobre la utilización pedagógica de este objeto educativo, e información sobre quién creó el comentario y cuando fue creado.
9	Clasificación	Esta categoría describe dónde se sitúa este objeto educativo dentro de un sistema de clasificación concreto.

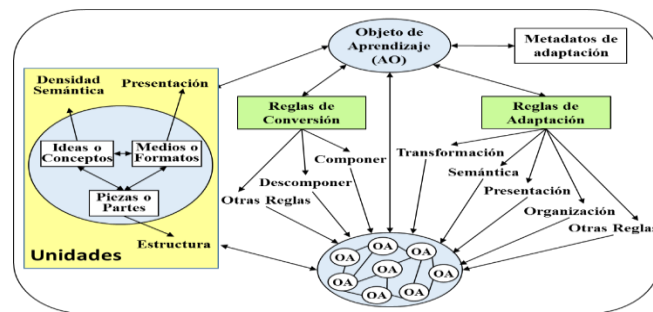


Fig. 1. Modelo Objeto de Aprendizaje Adaptativo-MOAA (Guevara y col., 2016)

Un OAA está compuesto por:

- OA: es el componente a adaptar, de acuerdo a la información obtenida del contexto.
- Unidades: son pequeños bloques o fragmentos, tales como conceptos, medios o piezas, en que se descompone el OA. Los conceptos son las ideas que se manejan en un

OA; los medios son los distintos formatos en que se presentan las ideas y las piezas son las partes en que se estructura el OA.

- Reglas: se definen dos categorías de reglas, las de Adaptación y las de Conversión, que especifican, respectivamente, los ajustes estructurales o contextuales que se le realizan al OA.
- Metadatos de Adaptación: describe los datos y procesos requeridos para facilitar el proceso de adaptación del OA.

Las reglas de adaptación y de conversión del OAA interactúan de forma dinámica y concomitante para lograr la adaptación semántica, de presentación del contenido, organización, o la customización del OA, o bien la combinación de varios o todos los anteriores, transformando al OA de acuerdo a los requerimientos del contexto.

2.3 Ontologías

Una ontología es la especificación de una conceptualización. Está compuesta por conceptos, relaciones, axiomas, instancias y funciones. Los Conceptos son las ideas básicas que se intenta formalizar. Las Relaciones representan la interacción y enlace entre los conceptos del dominio, suelen formar la taxonomía del dominio. Las Funciones son un tipo de relación donde se identifica un elemento en particular empleando una función que utiliza diversos elementos de la ontología. Las Instancias se utilizan para representar objetos determinados de un concepto y los Axiomas son teoremas que se declaran sobre relaciones que deben cumplir los elementos de la ontología, estos últimos permiten inferir conocimiento que no está explícitamente señalado en la taxonomía de conceptos (Gruber 1993).

Las ontologías proporcionan una forma de representar conocimiento de un cierto dominio de una manera estructurada y sobre todo para ser entendida por computadores y también por humanos (Vidal y col., 2010).

Una ontología define los términos a utilizar para describir y representar un área de conocimiento. Son utilizadas por las personas, bases de datos y aplicaciones que necesitan compartir un dominio de información (un dominio es un área o sub-área específica de conocimiento, como la medicina, la fabricación de herramientas, la administración, etc.). Las ontologías incluyen definiciones de conceptos básicos del dominio y sus relaciones, que pueden ser usadas por los computadores [...]. Codifican el conocimiento de un dominio, así como el conocimiento que se extiende del dominio. De esta manera hacen que el conocimiento sea reutilizable. (W3C 2003).

De acuerdo a (Barchini y col., 2006), citando a Mizoguchi et al, las ontologías se pueden clasificar en: Ontologías de Alto Nivel (genéricas), describen conceptos muy generales los cuales son independientes de un problema o dominio en particular; Ontologías de Dominio, describen

el vocabulario relacionado a un dominio genérico; Ontologías de Tarea, describen una tarea o actividad genérica; Ontologías de Aplicación, describen conceptos que dependen tanto de un dominio como de una tarea en particular. Mientras que Steve (1997) las clasifica en Generales, de Dominio y Específicas.

3 Metadatos de Adaptación

El estándar LOM es una iniciativa de la IEEE para describir metadatos de los OA. Está compuesto por 9 categorías que agrupan 80 descriptores los cuales son utilizados para facilitar la accesibilidad, la reusabilidad y la interoperabilidad de los OA. El estándar LOM cubre bastante bien, desde una perspectiva estática, la descripción de los metadatos de los OA. Sin embargo, a causa del desarrollo tecnológico y a la introducción de paradigmas emergentes en el ámbito de la educación en entornos virtuales, se hace necesario realizar una revisión del estándar con la finalidad de incorporar facilidades para abordar dinámicamente el proceso de adaptación autonómica de los OA, debido principalmente a que la versión actual del estándar no provee información sobre los métodos y servicios requeridos para adaptar un OA.

En razón de lo anterior, se presenta la propuesta de incorporar una extensión al estándar LOM (definida como Categoría 10) con el fin de facilitar la búsqueda, evaluación, recuperación y aplicación de los métodos de adaptación de un OAA.

Para la preparación de la propuesta se trabajó con las definiciones formuladas por el estándar LOM en (IEEE 2002).

Alcance de la propuesta: definición de la Categoría 10. (Metadatos de adaptación autonómica).

Propósito: facilitar la búsqueda, evaluación, recuperación y aplicación de los métodos de adaptación de los OAA.

Definiciones:

- Categoría: grupo de elementos de datos.
- Tipo de datos: característica común de los valores que puede tomar un elemento de dato y las operaciones que puede realizar.
- LangString: Tipo de dato que representa uno o masString de caracteres.
- Valores: conjunto de valores explícitamente especificados que puede tomar un elemento.
- Orden: indica si el orden de los datos es relevante o no. "No especificado" indica que no es relevante el orden. En la categoría 10, para todos los elementos el orden no es relevante.

En la Tabla 3 se presenta la Categoría 10 con el detalle de los elementos que la conforman.

Tabla 3. Categoría 10. Metadatos de Adaptación Autonomica

Nro	NOMBRE	DESCRIPCION	TAMAÑO	VALORES	TIPO DE DATOS
10	AdaptacionAutonomica	Esta categoría agrupa la información necesaria para facilitar el proceso de adaptación autónomo de un Objeto de Aprendizaje	Maximo: 20 items		LangString
10.1	Identificacion Regla Base	Identifica una regla bien sea de adaptación a de conversión.	1		
10.1.1	Categoría	Categoría de la Regla. Se definen 2 categorías de reglas base, Adaptación y Conversión.	1	A: Adaptación; C: Conversión	CharacterString
10.1.2	Nombre	Nombre que se le da a la regla	1		CharacterString
10.1.3	Tipo	Tipo de Regla		S: Semántica, P: Presentación; O: Organización, C: Composición, D: Descomposición, X: Otra	CharacterString
10.1.4	Código de la Regla	Código asignado a la regla	1		CharacterString
10.2	Descripción	Descripción de la Regla Base	1		CharacterString
10.3	Dirección Ubicación de la Regla	Dirección URL, URI o repositorio donde se hospeda la regla	1		CharacterString
10.4	Nivel de Especificación de Adaptación	Detalla el tipo de adaptación que se quiere aplicar	Maximo: 4 items	0=General; <>0= de acuerdo a la regla	LangString
10.5	Tipo de Acción permitida	Posibles Acciones que ejecuta la regla	1	"Agregar", "Resumir", "Eliminar", "Modificar", "Convertir", "Comprimir", "Extraer", "Traducir", "Customizar", "Reordenar" ""No especificada"	CharacterString
10.6	Catalogo Reglas Derivadas	Catalogo de Reglas Derivadas asociadas con el proceso de adaptación	Maximo: 10 items		LangString
10.6.1	Identificación	Identificación del catalogo de reglas asociadas	1		CharacterString
10.6.1.1	Nombre	Nombre del archivo que contiene el catalogo	1		CharacterString
10.6.1.2	Tipo Archivo	Tipo de archivo en donde se encuentra el catalogo de reglas	1	XML	CharacterString
10.6.1.3	Dirección de Ubicación Catalogo	Dirección URL-URI o repositorio de datos en donde se encuentra almacenado el catálogo	1		CharacterString
10.6.2	Descripción	Descripción del catálogo	1		CharacterString
10.6.3	Regla del catalogo	Regla contenidas en el catálogo	1		
10.6.3.1	Código	Código de la Regla	1		CharacterString
10.6.3.2	Nombre	Nombre	1		CharacterString
10.6.3.3	Descripción	Descripción	1		CharacterString
10.6.3.4	Ubicación Regla	Dirección URL-URI o repositorio de datos en donde se encuentra almacenada la regla	1		CharacterString
10.7	Catalogo Servicios Requeridos	Lista de Servicios requeridos para ejecutar el proceso de adaptación	Maximo: 10 items		

10.7.1	Indentificacion	Identificación del servicio	1		
10.7.1.1	Nombre	Nombre del archivo que contiene la lista de servicios	1		CharacterString
10.7.1.2	Tipo Archivo	Tipo de archivo en donde se encuentra la lista de servicios	1	XML	CharacterString
10.7.1.3	Dirección de Ubicación Servicio	Dirección URL-URI o repositorio de datos en donde se encuentra almacenado el servicio	1		CharacterString
10.7.2	Descripción	Descripción del servicio	1		CharacterString
10.7.3	Servicio	Servicio contenido en el catálogo de servicios	1		
10.7.3.1	Código	Código del Servicio	1		CharacterString
10.7.3.2	Nombre	Nombre	1		CharacterString
10.7.3.3	Descripción	Descripción	1		CharacterString
10.7.3.4	Ubicación del Servicio	Dirección URL-URI o repositorio de datos en donde se encuentra almacenado el servicio	1		CharacterString
10.8	Procedimiento General	Procedimiento General de la Regla (Tipo Archivo XML)	1		LangString
10.9	Autor Creación	Autor Creación	1	vCard	CharacterString
10.10	Fecha de creación	Fecha de Creación de la Regla	1		DateTime
10.11	Autor Modificación	Nombre del Modificador de la Regla	1	vCard	CharacterString
10.12	Fecha de modificación	Fecha de modificación de la Regla	1		DateTime

4 Modelo Ontológico del Estándar LOM Extendido

El modelo ontológico diseñado se centra en la extensión propuesta del Estándar LOM la cual hemos denominado Categoría 10. La metodología utilizada y su construcción se indican a continuación.

4.1 Metodología para la construcción de la ontología

En el diseño de la ontología propuesta se utilizó la metodología Methontology (Fernández y col, 1997), la cual sugiere la ejecución de las siguientes etapas:

- Especificación: se definen los objetivos, el dominio y el alcance de la ontología. El objetivo definido es el presentar un modelo ontológico de la categoría 10 propuesta como una extensión del estándar LOM, con el fin de facilitar la búsqueda, evaluación, recuperación y aplicación de los métodos de adaptación de los OAA.
- Conceptualización: se definen los conceptos, relaciones y axiomas de la ontología. En esta fase se describieron los datos y sus atributos, que conforman la categoría 10 del estándar LOM los cuales se presentan en la Tabla 3.
- Integración: considera la revisión de otras ontologías construidas que puedan integrarse a la ontología que se está diseñando. Se hizo la revisión de varias ontologías que representan las 9 categorías básicas del Estándar LOM y que pueden integrarse a esta propuesta.
- Implementación: en esta etapa se emplean herramientas o lenguajes que permitan la codificación o representa-

ción de la ontología. Para esto se trabajó con el programa protégé.

- Evaluación: permite verificar el correcto comportamiento de la ontología construida.

4.2 Presentación de la ontología de la Categoría 10 del Estándar LOM (OLOMCat10)

Basado en las descripciones de los distintos elementos presentados en la Tabla 3, se diseñó la ontología OLOMCat10, la cual nos permite conceptualizar semánticamente la categoría 10 propuesta como extensión del Estándar LOM. En ella se definieron 4 entidades básicas que forman sus clases principales. A continuación se describen sus componentes:

Conceptos

- Categoría 10: Categoría propuesta que extiende el estándar LOM para facilitar el proceso de adaptación de los OAA
- Regla Base: Regla inicial que dispara el proceso de adaptación del OAA
- Catálogo de Reglas: es un catálogo que describe y direcciona un conjunto de reglas derivadas que complementan la regla base.
- Catálogo de Servicios: lista o catalogo que describen un conjunto de servicios requeridos por el proceso de adaptación del OAA

Relaciones

- Tiene: define una relación de jerarquía entre los componentes de la ontología. Relaciona la Categoría10 con las demás clases que pertenecientes a la categoría.
- Usa: indica que un elemento Usa otro elemento.,
- EsUsadoPor: señala cuando un elemento es usado por otro.
- EsUn: indica cuando un elemento caracteriza a otro, relaciona los atributos de las clases con sus tipos de datos.
- Complementa Otro Servicio: relación utilizada para indicar que un servicio puede ser complementado por otro servicio.
- Complementa Otra Regla: relación utilizada para indicar que una regla puede ser complementada por otra regla.
- Requiere: esta relación es utilizada para indicar que un elemento (reglas) requiere de otro elemento (servicios) para cumplir sus propósitos.
- Es Parte De: indica cuando el elemento es parte de otro OA.

Axiomas

A continuación se presentan algunos axiomas definidos en OLOMCat10

$\forall x \in \text{Cat10}$

$\exists y \subseteq \text{ReglasBase} \wedge \exists z \in \text{CatServicios} \wedge \exists k \in \text{CatReglas}$
 $\exists y, z, k \in \text{Cat10}$

Para todo x que pertenece la Categoría 10, existe una Regla Base, existen servicios del catálogo de servicios y reglas del catálogo de reglas diseñados para adaptar a x. En otras palabras, tiene una regla base, tiene otras reglas y servicios para la adaptación de x.

$\forall x \in \text{CatServicio}$

$\exists y \subseteq \text{CatServicio} \exists y \text{ComplementaServicio}(x)$

Para todo x que pertenece a la Categoría 10 del Estándar LOM, existen servicios que complementan otros servicios

$\forall x \in \text{CatReglas}$

$\exists y \subseteq \text{CatReglas} \exists y \text{ComplementaRegla}(x)$

Para todo x que pertenece a la Categoría 10 del Estándar LOM, existen servicios que complementan otros servicios,

$\exists x \in \text{CategoriaReglaBase} \wedge \exists y \subseteq \text{TipoReglaBase} \wedge$
 $\exists z \in \text{TipoAccion} \Rightarrow \text{CodigoReglaBase}(?x, ?y, ?z, \text{"Codigo"})$

Si "x" es una Categoría definida entre las Reglas Base and "y" es un Tipo de Regla Base and "z" es una Acción permitida entonces devuelve el Código de la Regla Base

En la Fig. 2 se muestra la ontología OLOMCat10 y en Fig. 3 se presenta la taxonomía construida con ella utilizan-

do el programa Protegé. Mientras que en la Fig.4 se observan algunos atributos de las clases definidas en la ontología, con sus propiedades

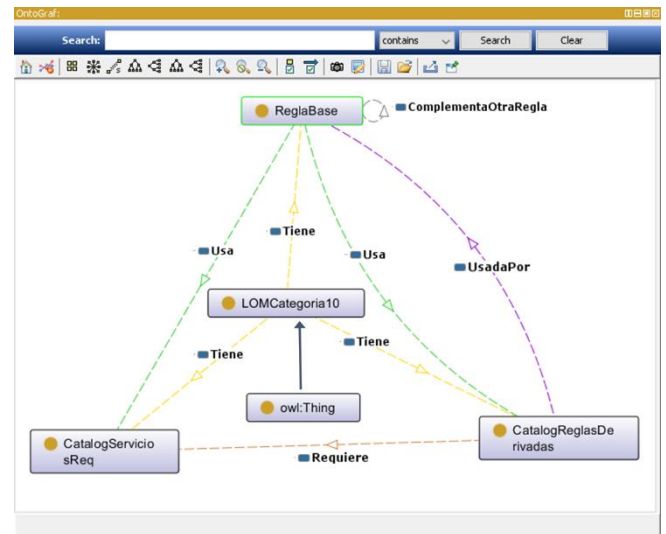


Fig. 2. Modelo Ontológico de la Extensión del Estándar LOM (OLOMCat10)

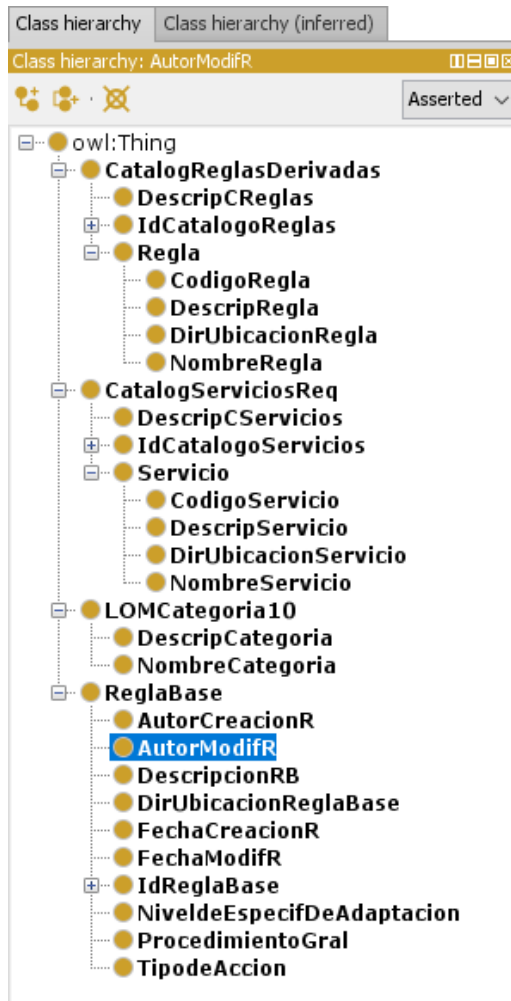


Fig. 3. Taxonomía de la ontología OLOMCat10

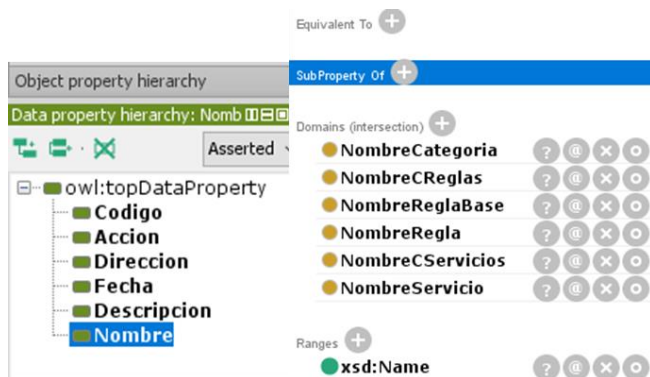


Fig. 4. Atributos y propiedades de las clases de OLOMCat10

La ontología OLOMCat10 diseñada, como se observa en la Fig. 2, relaciona la Categoría 10 con 3 componentes principales: una regla base, un catálogo de reglas y uno de servicios. Los catálogos lo que contienen es información sobre las reglas y servicios, así como posible direcciones en donde podrían encontrarse. Esto se hace con la finalidad de independizar al OAA de las reglas de adaptación así como

los servicios utilizados para transformarlos. Su concepción es ubicua por lo que le confiere flexibilidad para incorporar y/o modificar reglas y/o servicios, permitiendo además poder compartir los catálogos entre distintas poblaciones de OAA.

5 Resultados y Discusión

En la sección I del presente artículo se presentaron algunos trabajos relacionados con el tema de interés. Entre ellos tenemos:

1. La propuesta de (Vidal y col., 2010) quienes presentan una ontología para la secuenciación de Objetos de Aprendizaje mediante un proceso de adquisición de conocimiento apoyado en el modelado de los metadatos de los OA de acuerdo al estándar IEEE-LOM, lo cual le permite clasificar y recomendar recursos de aprendizaje conforme al contexto instruccional requerido. El tratamiento que realizan con los metadatos LOM es sólo para la extracción de conocimiento requerido por su ontología con el fin de recomendar secuencias de OA basado en las características individuales de los estudiantes.
2. La ontología presentada por (Andrade y col., 2012) está orientado al uso de los metadatos LOM para construir OA desde la perspectiva de la gestión del conocimiento con el fin de aprovechar el conocimiento organizacional. Su interés está más centrado en crear un ambiente colaborativo en vez de un contexto adaptativo.
3. El trabajo desarrollado por (Casali y col., 2013) se basa en la representación ontológica del estándar LOM para lo cual se ajustan estrictamente a la definición de las categorías y elementos de datos que están expresados en el estándar actual. Su aporte principal está en hacer un mapeo entre los elementos del estándar y los componentes de una ontología para construir un asistente que facilite la carga de metadatos de OA, sin proponer ningún elemento de adaptación.
4. En el artículo presentado por (Behr y col., 2014) introducen una ontología OWL creada para representar todos los metadatos del estándar IEEE-LOM. Proponen una extensión del estándar para permitir la interoperatividad y adecuación de los OA al contexto educativo brasileño, solamente para facilitar la sincronización de distintos medios o formatos empleados en las VideoAulas, mas no para hacer una adaptación del OA como tal.
5. La propuesta presentada por (Milošević y col., 2007), está orientada a la adaptación de contenidos educativos basado en el estilo de aprendizaje y en el nivel de motivación del alumno, para lograr su objetivo diseñan una ontología fundamentada en los metadatos para OA de SCO. Su trabajo se limita a recomendar recursos instruccionales de acuerdo a las características de los estudiantes.

Los trabajos revisados en el marco de esta investigación están orientados a construir ontologías de OA, apegados al estandar actual de IEEE-LOM, por lo que sus autores se enfocan mas en determinar contenidos instruccionales que pueden ser ofrecidos a los estudiantes de acuerdo a sus necesidades que en producir objetos de aprendizaje adaptativos.

Entre las ventajas de nuestra propuesta sobre los trabajos revisados, están:

1. Centra el interés en la producción de objetos de aprendizaje adaptativos.
2. Ofrece incorporar al estandar LOM, una categoría para el manejo de datos que faciliten el proceso de adaptación de los OAA, con la finalidad de que el estandar se adecúe a las exigencias actuales demandadas por los paradigmas emergentes en el campo de la educación virtual.
3. Se describe de forma detalla, los metadatos a ser considerados en la propuesta de extensión del estandar LOM.
4. La definición de los metadatos considerados para la categoría propuesta se ajustan al vocabulario y tipos de datos establecido en el propio estándar, con la finalidad de mantener consistencia y los estandares de las categorías actuales.
5. Se presenta una ontología de la categoría propuesta con la finalidad de hacer su conceptualización semántica para su mejor entendimiento.
6. Los metadatos se definen de forma estructurada .
7. La ubicuidad de las reglas y de los servicios requeridos para adaptar los OAA le confiere flexibilidad y permite compartir información entre distintos gestores de OAA.

6 Conclusiones

El resultado principal de este trabajo es la presentación detallada de la categoría 10 (metadatos de adaptación) propuesta como una extensión del estándar LOM, con la finalidad de facilitar la búsqueda, evaluación, recuperación y aplicación de los métodos de adaptación de un OAA.

Como un aporte adicional, se hizo una conceptualización semántica de la categoría propuesta, mediante la construcción de una ontología implementada en protegé.

El trabajo acá presentado, es una continuidad del Modelo de Objeto de Aprendizaje Adaptativo para Entornos Virtuales formulado recientemente por estos mismos autores, como trabajo inédito.

Entre las características principales de la categoría propuesta para la extensión del estándar LOM, es la definición estructurada de los metadatos; y la concepción ubicua de las reglas y de los servicios requeridos para adaptar los OAA, lo que le confiere flexibilidad, interoperatividad, además de permitir compartir información de adaptación entre distintos sistemas gestores y repositorios de OAA.

Dentro del marco de esta investigación, existen diver-

sos trabajos futuros a desarrollar, entre los que se encuentran la caracterización ontológica de un Objeto de Aprendizaje Adaptativo y la construcción de un middleware que brinde servicio a los OAA, entre otros.

Referencias

- Andrade A, Reinehr S, Malucelli A, 2012, Ontology for Organizational Learning Objects. XXXVIII Conferencia Latinoamericana en Informatica (CLEI), 2012, pp. 1-10. IEEE.
- Barchini GA, Herrera S, 2006, Sistemas de información: nuevos escenarios basados en ontologías. JISTEM-Journal of Information Systems and Technology Management, Vol 3, No 1, pp. 3-18.
- Barriga F, Hernandez G, 2002, Estrategias Docentes para un Aprendizaje Significativo. Una interpretación Constructivista (Segunda ed.). Mexico: McGraw-Hill, pp. 465
- Behr A, Primo T, Vicari R, 2014, OBAA-LEME: A Learning Object Metadata Content Editor supported by Application Profiles and Educational Metadata Ontologies. Anais dos Workshops do Congresso Brasileiro de Informática na Educação, Vol 3, No 1, pp. 455-464.
- Botsios S, Georgiou D, 2009, Using standards for adaptive learning objects retrieval. Journal of Knowledge and Learning.
- Casali A, Deco C, Romano A, Tomé G, 2013, An Assistant for Loading Learning Object Metadata: An Ontology Based Approach. Interdisciplinary Journal of E-Learning and Learning Objects, Vol 9, pp. 77-87.
- Castañeda L, Adell J, 2012, Entornos Personales de Aprendizaje: claves para el ecosistema educativo en red.España: Marfil.
- DCMI., 2012, Dublin Core Metadata Element Set, Version 1.1.
- Duque N, 2009, Modelo adaptativo multi-agente para la planificación y ejecución de cursos virtuales personalizados. (Doctoral dissertation). Universidad Nacional de Colombia.
- Fernández M, Gómez-Pérez A, Juristo N, 1997, METHONTOLOGY: From Ontological Art Towards Ontological Engineering. AAAI Technical Report SS-97-06, pp. 33-40.
- Gruber T, 1993, A translation approach to portable ontology specifications. En Knowledge Acquisition, Vol. 5, No. 2., pp. 199-220.
- Guevara C, Aguilar J, 2016, Modelo de Objeto de Aprendizaje Adaptativo para Entornos Virtuales. Proceedings de la XLII Conferencia Latinoamericana en Informática (CLEI 2016), pp. 419-428, IEEE.
- Gutierrez I, 2008, Usando Objetos de Aprendizaje en Enseñanza Secundaria Obligatoria. EDUTEC- Revista Electrónica de Tecnología Educativa, Nro 27 (Noviembre 2008), pp. 1-17.
- IEEE., 2002, Standard for Learning Object Metadata. Final

Draft Standard .

Menéndez V, Castellanos M, Zapata A, Prieto E, 2011, Generación de Objetos de Aprendizaje empleando un enfoque asistido. Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación, Nro 38 (Julio-Diciembre 2010), pp. 141-153.

Milošević D, Brković M, Debevc M, Krneta R, 2007, Adaptive Learning by Using SCOs Metadata. Interdisciplinary Journal of Knowledge and Learning Objects, Vol. 3, No 1, pp. 163-174.

Rosenberg M, 2001,. E-Learning: Estratégias para transmitir conocimiento en la era digital. Bogotá: McGraw Hill. pp. 350

Senso J, Piñer, A, 2003, El concepto de metadato. Algo más que descripción de recursos electrónicos. Ciência da Informação, Vol. 32, No 2, pp. 95-106.

Steve, G, Gangemi A, Pisanelli D, 1997, Integrating Medical Terminologies with ONIONS Methodology. En: InformationModelling and Knowledge Bases VIII (IOS 1997), Press.

Vidal C, Ferreira, M, 2010, Modelo Ontológico para la Secuenciación de Objetos de Aprendizaje. IEEE-RITA. Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje, Vol. 5, No 2, pp. 63-67.

W3C, 2003, What is an ontology?, Consorcio World Wide Web

Wiley D, 2000, Connecting learning objects to instructional design theory: A definition, a metaphor, and a taxonomy. In DA, Wiley (Ed.), The Instructional Use of Learning Objects: Online Version, pp. 1-35

Guevara, Carlos: Profesor en la Universidad Nacional Experimental de Guayana. Ingeniero en Computación. Especialista en Finanzas. Magister en Gerencia. Doctorando en Ciencias de la Ingeniería, UNEXPO.

Aguilar, Jose: Profesor en la Universidad de los Andes. Ingeniero de Sistemas, Magister en Ciencias de la Computación. Doctor en Ciencias de la Computación.
Correo electrónico: aguilar@ula.ve

Capítulo 37

Filtro de información unscented en arquitectura federada adaptativa aplicada a la destilación

Miranda, Moira^{1*}; Méndez, Dayana¹; Flores Rigoberto¹

¹ Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

*moira@ula.ve

Resumen

Este artículo presenta la estimación de estado de una columna de destilación por lotes a través de la fusión de múltiples filtros individuales, bajo una arquitectura federada usando un algoritmo de Información Unscented Adaptativo. La propuesta de filtro consiste en utilizar dos estrategias: a) Filtros locales de Información Adaptativos, cada filtro local de información será robusto a las variaciones de las señales de medición, por medio de la adaptación de la covarianza del ruido. b) Un filtro maestro que trabajará bajo una estructura de Información Federada con factor de intercambio de información adaptativo. La idea es cambiar el factor de intercambio de información de acuerdo al rendimiento de cada filtro local y por lo tanto cambiar la proporción de la información de la estimación del filtro local al filtro maestro. El filtro es comparado con las tradicionales soluciones centralizadas, y su equilibrio entre la capacidad de tolerancia a fallo y la precisión de la estimación es evaluado. Los resultados muestran que el filtro de Información Unscented Adaptativo en una estructura de Filtro Federado es capaz de incrementar la robustez del filtro en presencia de incertidumbres en la señal de medición y fallas en los sensores mejorando de manera significativa la precisión de la estimación.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

La destilación por lotes es un método de separación ampliamente usado para la obtención de productos con alto valor comercial, tales como productos farmacéuticos, polímeros, u otros productos de química fina. Una de las ventajas de la destilación por lote es su flexibilidad al cambio frecuente de las especificaciones de los productos. Sin embargo, esta flexibilidad puede generar problemas en el control debido a la naturaleza no lineal y no estacionaria del proceso.

La destilación por lote es un proceso no estacionario y por lo tanto no existe una condición normal en que un modelo lineal de entrada/salida pueda ser formulado. Con el propósito de monitorear, optimizar y controlar el proceso las composiciones de las diferentes etapas de la columna son requeridas, las cuales pueden ser medidas directamente a través de analizadores en línea. Aunque hay un gran desarrollo en la tecnología de analizadores de composición, estos generan grandes retrasos en la medición y altos costos de inversión y mantenimiento. Por lo tanto, las composiciones se infieren usualmente a partir de las mediciones de las temperaturas de las diferentes etapas, utilizando filtros, generalmente llamados sensores virtuales u observadores de estado. Una de las características de la instrumentación de una columna de destilación es la gran cantidad de sensores a lo largo de la columna. En un ambiente con múltiples sensores, la información de cada sensor puede ser diferente incluso para el mismo elemento. Cuando varios sensores miden el mismo estado del sistema en general se tienen dos enfoques para procesar los datos de los sensores: el centralizado y el distribuido.

En el primer enfoque, todos los datos de los sensores de medición se comunican a un solo filtro el cual es usado para estimar el conjunto completo de las variables de estado del sistema. La ventaja de este método es que implica la pérdida mínima de información. Sin embargo, puede resultar en una sobrecarga de cálculo y es poco fiable cuando existe una falla grave en los datos. En el segundo enfoque el descentralizado o distribuido, existen varios nodos o filtros que procesan su propia información a partir de las mediciones obtenidas de sus sensores. Luego los datos de cada filtro son comunicados a un nivel superior para producir una estimación global mejorada.

Para el procesamiento de múltiples datos el filtro de Información de Kalman ha sido utilizado ampliamente tanto en el enfoque centralizado, como en el descentralizado. Este filtro, que es esencialmente un filtro de Kalman expresado en términos de la matriz inversa de la covarianza ha sido utilizado en la estimación lineal con múltiples sensores, debido a sus ventajas con respecto a la norma del filtro de Kalman (Liu y col., 2011). Para sistemas no lineales el filtro de Información de Kalman puede ampliarse mediante un algoritmo de estimación

linealizado utilizando el filtro de Kalman Extendido (FKE), el cual es llamado Filtro de Información Extendido (FIE). Sin embargo, algunos de los inconvenientes del FKE son heredados por el FIE, en términos de truncamiento debido a las aproximaciones de primero y segundo orden de las series de Taylor.

Para resolver este problema, (Deok-Jin 2008), desarrolló un algoritmo llamado Filtro de Información de Sigma Puntos (FIU), basado en la transformación Unscented usando la estructura de filtro de Información. El FIU utiliza un número de puntos determinísticos llamados sigma puntos que permiten captar la verdadera matriz de Información y el vector de Información. El FIU es superior al FIE, no solo en términos de la precisión de la estimación, sino también en la velocidad de convergencia para la estimación no lineal y la fusión de múltiples sensores.

El FIU puede ser adaptado para trabajar bajo una estructura particular de Filtro de Kalman Federado (FKF) desarrollado por (Carlson 1988, 1993), el cual se basa en el principio de intercambio de información a través de los filtros. La estructura consiste en varios filtros locales y un filtro maestro o de fusión, cada subsistema tiene asignado un filtro local. Los filtros locales trabajan en paralelo y su solución es periódicamente fusionada por el filtro maestro.

Aunque, las estructuras descentralizadas han sido extensamente estudiadas para reducir la alta carga computacional, su potencial para la tolerancia y detección de fallas no ha sido completamente desarrollado. De cualquier forma, mientras la teoría de filtros Federados ha sido bien desarrollada para sistemas lineales, experiencias con aplicaciones de sistemas no lineales son muy pocas. Edelmayer y col., (2011) utilizan la estructura de filtro Federado de Kalman, con filtros locales Extendidos de Kalman para la estimación de estado de una columna de destilación continua, confirmado la robustez de la estructura Federada. El desempeño del filtro Federado Unscented fue evaluado estimando la altitud de un satélite, demostrando que para un sistema no lineal, el filtro Unscented tiene mejor rendimiento que el filtro de Kalman (Jonghee y col., 2010).

En este artículo se propone un filtro de Información Adaptativo en una Arquitectura Federada (FI AF), combinando dos estrategias, primero, se usará un filtro de Información Federado donde el filtro maestro, usará un enfoque de adaptación de factores de intercambio de información, basado en la descomposición del valor propio de la matriz de covarianza del error estimado, propuesto por (Zhang 2002) y segundo los filtros locales serán filtros de Información Unscented Adaptativos (FIUA). La combinación de estas dos estrategias adaptadas a filtros de Información Unscented, permitirá mejorar potencialmente la tolerancia a fallas y obtener robustez ante los cambios estadísticos del ruido de observación.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2, se detallan los fundamentos básicos de la estructura del Filtro de Información Unscented y el filtro de Información Federado. En la sección 2.2, se presenta el modelo de la columna de destilación por lotes, que utilizarán los diferentes algoritmos de filtrado. En la sección 3, se especifica la estrategia de funcionamiento del filtro propuesto, y por último se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones de los filtros para estimar el estado de la columna de destilación bajo diferentes escenarios de operación.

2 Filtro de Información Unscented

El filtro de Kalman Unscented (FKU) es una formulación para sistemas altamente no lineales, presentada por (Julier y col.1995) y perfeccionada por (Wan y Van der Merwe, 2000). Este filtro emplea la transformación ‘Unscented’, que calcula un conjunto mínimo de puntos de muestreo seleccionados cuidadosamente, llamados “puntos sigma”. Estos puntos capturan completamente la media y covarianza verdadera del estado y cuando se propagan a través del sistema no lineal, la media y covarianza posterior se obtiene para cualquier no-linealidad presente en el sistema de forma precisa. El algoritmo básico del Filtro de Información Unscented (FIU) es una adaptación del FKU, pero en términos de variables analíticas de información, las cuales son medidas de la cantidad de información de un parámetro (estado) de interés. Considere el sistema dinámico no lineal y su sistema de medición descrito en espacio de estado como:

$$\dot{x}_{k+1} = f_i(x_k, u_k) + w_k$$

$$z_k = h(x_k) + v_k \quad (1)$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$, $z \in \mathbb{R}^p$, denotan los vectores de estado, entrada y salida del sistema $w(t)$ y $v(t)$, son ruidos que afectan al sistema y a la medición, de covarianza Q y R , respectivamente. Asuma que cada sensor mide una señal z_k la cual es corrompida por un ruido v_k que tienen una distribución gaussiana con media cero. El estimado local y su covarianza del filtro serán representados por $\hat{x}_k$ y P_k . El algoritmo del filtro de Información Unscented es considerado como una extensión del filtro Unscented de Kalman, en términos de la matriz de información $Y_k = P_k^{-1}$ y el vector de información de estado $\hat{y}_{k/k}$. El FIU puede ser ilustrado como sigue:

Paso 1: Iniciación.

Se fija a priori el vector inicial de estados x_{k-1} y la covarianza del error P_{k-1}

Paso 2: Cálculo de los puntos sigma y sus pesos.

$$\chi_k = [\hat{x}_{k-1} \quad \hat{x}_{k-1} + \gamma \sqrt{P_{k-1}} \quad \hat{x}_{k-1} - \gamma \sqrt{P_{k-1}}]$$

$$W_o^m = \lambda / (L + \lambda)$$

$$W_o^c = \lambda / (L + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta)$$

$$W_i^c = W_i^m = \lambda / (2(L + \lambda)), \quad i = 1, \dots, 2L \quad (2)$$

donde $\gamma = \sqrt{L + \lambda}$, L es la dimensión del estado y λ es un parámetro escalar.

Paso 3: Ecuaciones de predicción.

$$\chi_{k/k-1}^* = f[\chi_{k-1}, u_{k-1}] \quad (3)$$

$$\hat{y}_{k/k-1} = Y_{k/k-1} \sum_{i=0}^{2L} W_i^m \chi_{i,k|k-1}^* \quad (4)$$

$$Y_{k/k-1} = P_{k/k-1}^{-1} \quad (5)$$

$$P_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c [\chi_{i,k/k-1}^* - \hat{x}_{k/k-1}][\chi_{i,k/k-1}^{*T} - \hat{x}_{k/k-1}^T] + Q \quad (6)$$

donde Q es la covarianza del ruido del proceso $\hat{y}_{k/k}$, el vector de estado de información y $Y_{k/k}$ su correspondiente matriz de información.

Paso 4: Ecuaciones para la medición actual

$$\hat{y}_{k/k} = \hat{y}_{k/k-1} + i_{k/k-1} \quad (7)$$

$$Y_{k/k} = Y_{k/k-1} + I_{k/k-1} \quad (8)$$

donde

$$I_{k/k-1} = H_{k/k-1} R^{-1} H_{k/k-1}^T \quad (9)$$

$$H_{k/k-1} = Y_{k/k-1} P_{xy_{k/k-1}} \quad (10)$$

$$i_{k/k-1} = H_{k/k-1} R^{-1} [v_{k/k} + P_{xy_{k/k-1}}^T Y_{k/k-1} \hat{y}_{k/k-1}] \quad (11)$$

$$v_{k/k} = z_k - \hat{z}_{k/k-1} \quad (12)$$

$$P_{xy_{k/k-1}} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c [\chi_{i,k-1} - \hat{x}_{k/k-1}][Y_{i,k|k-1} - \hat{z}_{k/k-1}]^T \quad (13)$$

$$Y_{i,k} = h[\chi_{i,k|k-1}^*] \quad (14)$$

$$\hat{z}_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c Y_{i,k|k-1} \quad (15)$$

$$\hat{x}_{k/k-1} = Y_{k/k-1}^{-1} \hat{y}_{k/k-1} \quad (16)$$

Donde $i_{k/k-1}$ es la aportación de información del estado y $I_{k/k-1}$ su matriz de información asociada.

2.1 Filtro de Información distribuido

En un sistema con múltiples sensores existen varios esquemas para incorporar la información de los sensores al estimador. Uno de los más usados es el esquema central. En este esquema de estimación, la información de todos los sensores es alimentada a un bloque de procesamiento llamado filtro central de procesamiento, obteniéndose la estimación del estado a la salida. Por lo tanto se procesan todas las mediciones en paralelo. Por supuesto tiene una estructura relativamente simple y su aplicación no es complicada. Pero, por otro lado, si el número de sensores aumenta o de manera equivalente, si el vector de medición asociado con el filtro centralizado se hace más grande, la carga de cálculo en el sistema aumenta. Además, esta estructura carece de robustez frente a datos de un sensor defectuoso, ya que toda la información del sistema se ve afectada por estos datos errados dentro del filtro.

El principio básico de un enfoque distribuido es el hecho de que cada filtro local opera autónomamente e

independientemente con sus propias mediciones. Se asume que los filtros locales no comparten información y que el filtro maestro no tiene acceso a las mediciones que alimentan a cada filtro. La arquitectura descentralizada mostrada en la figura 1, tiene un modo de operación jerárquico, porque las salidas de los filtros locales actúan como entradas al filtro maestro de fusión. Las salidas de los filtros locales corresponden a las mediciones del filtro maestro. El filtro maestro realiza la fusión de los filtros locales, como una combinación lineal del vector de información de estado y su matriz de información. Por lo tanto, las ecuaciones de actualización son expresadas en términos de la contribución de cada filtro local como:

$$\hat{y}_{k/k} = \hat{y}_{k/k-1} + \sum_{i=1}^N i_i / k \quad (17)$$

$$Y_{k/k} = Y_{k/k-1} + \sum_{i=1}^N I_i / k \quad (18)$$

para la etapa de predicción se utilizan las ecuaciones 4 y 5.

El Filtro del Kalman Federado (FKF) introducido por (Carlson1988) cuya estructura es mostrada en la figura 2, puede considerarse como una forma especial de un filtro descentralizado. El filtro de Kalman Federado puede obtener un estimado global aplicando el principio de compartir información con cada filtro local y entonces fusionar las estimaciones de los filtros locales. Este concepto de compartir información distingue al filtro Federado del filtro centralizado y descentralizado. El reto en el filtro Federado es determinar como la información total será dividida entre los filtros individuales para lograr una mayor tolerancia a fallos y un mejor rendimiento.

Para sistemas con filtros locales con estructura como (7) y (8), el vector de información global y su matriz asociada se definen como:

$$Y_f = \sum_{i=1}^N Y_i \quad (19)$$

$$y_f = \sum_{i=1}^N y_i \quad (20)$$

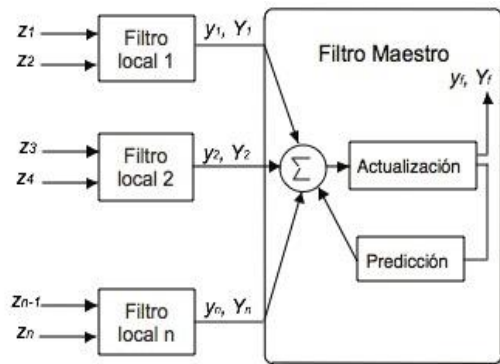


Fig. 1. Arquitectura del Filtro de Información Distribuido

Ahora la matriz de información del proceso y la matriz de covarianza del ruido del proceso son compar-

tidos entre los filtros locales y el filtro maestro según el esquema:

$$Q_i = (1/\beta_i)Q, Y_i = \beta_i Y_f \quad (21)$$

donde, $\beta_i > 0$ es el factor de intercambio de información y satisface la regla

$$\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_{N+1} = 1 \quad (22)$$

En la estructura del FKF, existe un sensor de referencia, que actúa como sensor fundamental en el sistema y sus datos son entrada al filtro maestro. Este sensor por lo general es más fiable y sus datos son utilizados a menudo en los filtros locales. Cada filtro local tiene sus propios sensores, además del sensor de referencia. Para la actualización, el filtro local utiliza la información de sus mediciones. Por el contrario, el filtro maestro utiliza las salidas de los filtros locales como mediciones para actualizar el vector de estado.

2.2 Modelo de la columna

Actualmente es posible encontrar en la literatura una gran variedad de modelos rigurosos que describen el proceso de destilación por lote (Mujtaba, 2004). Un modelo riguroso consiste en un gran número de ecuaciones diferenciales y algebraicas que requieren mucha información acerca del sistema (composición, flujos de vapor y líquido en cada etapa, hidráulica en los platos, balance de energía, etc.). Debido a la complejidad y requerimiento computacional, es impráctico el uso de un modelo riguroso para la estimación de estado.

El filtro requiere de un modelo más simple, que todavía capture las partes esenciales de la dinámica del proceso. Este modelo y sus supuestos se pueden resumir como sigue: Las variables de estado son las fracciones molares del líquido en cada etapa x_i . Para un sistema de n_c componentes la $\sum_{i=1}^{n_c} x_i = 1$, por lo tanto, es suficiente considerar $n_c - 1$ variables de estado en cada etapa, porque la fracción molar del n_c^{th} componentes puede ser obtenida por simple substracción.

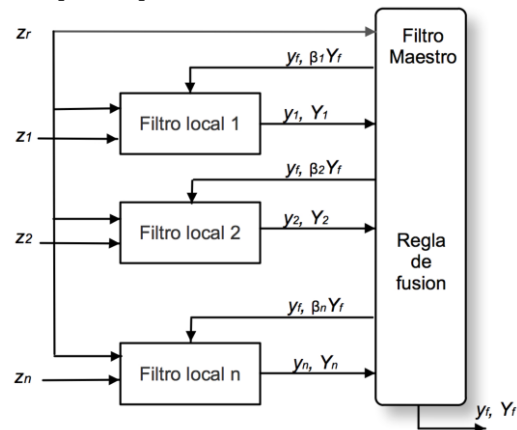


Fig.2. Arquitectura del Filtro de Kalman Federado

El proceso está controlado por la razón de reflujo interna, la cual está definida por la ecuación (23),

$$u = R = \left[\frac{L}{V} \right], \quad (23)$$

donde L y V son los flujos de vapor y líquido que se asumen constantes a lo largo de la columna. Entonces, el modelo no lineal de la columna de destilación por lotes en su representación en espacio de estado con $x \in \mathbb{R}^n$ y $n_c=2$ sujeto a ruido, es como se representa en la ecuación (24),

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_j \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V}{M_1}(y_2 - x_1) \\ \vdots \\ \frac{V}{M_j}(y_{j+1} - y_j) + \frac{RV}{M_j}(x_{j-1} - x_j) \\ \vdots \\ \frac{RV}{M_n}(x_{n-1} - x_n) + \frac{V}{M_n}(y_n - x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_j \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}, \quad (24)$$

donde, x_i y y_i denotan la fracción molar del componente c_i , en los flujos de líquido y vapor, respectivamente, que abandonan la etapa j . La etapa 1, corresponde al producto destilado que se obtiene de la columna. El sistema no es directamente observable. Las variables observables del proceso son las temperaturas en cada etapa $\varphi_j = T_i$. El sistema de mediciones es modelado como una función del vector de estado $h(x)$ corrompida por ruido, representado por la ecuación (25)

$$T = h(x) + v \quad (25)$$

La relación no lineal $h(x)$ entre la temperatura y la fracción molar puede ser obtenida de las ecuaciones del equilibrio líquido-vapor (Perry1967).

La precisión del modelo (24) fue validado utilizando una columna de destilación por lotes experimental, modelo CE600 de la compañía alemana GUNT, para mayor detalle vea (Miranda2011) que consta de 10 etapas de equilibrio, es decir, 8 platos, un condensador total y un rehervidor, donde se lleva a cabo una separación de una mezcla de 30% en peso de etanol y agua. La columna tiene sensores que permiten registrar las temperaturas en cada etapa a diferentes intervalos de tiempo.

Con el fin de diseñar el filtro es necesario que el sistema sea observable. Se sabe que un proceso de destilación con n componentes es considerado observable si al menos n mediciones de temperatura a lo largo de la columna están disponibles para la síntesis del filtro (Yu y col., 1987). En este trabajo se utilizan dos mediciones de las diez mediciones de temperatura disponibles para el desarrollo del filtro.

3 Propuesta de un filtro

La propuesta de filtro de este trabajo consiste en utilizar dos estrategias: a) Filtros locales de Información adaptativos, cada filtro local de información será robusto a las variaciones de las señales de entrada, por medio de la adaptación de la covarianza del ruido. Para tal efecto la covarianza será corregida basada en las características del ruido, compensando fallas incipientes en los sensores. b) El filtro maestro trabajará bajo una estructura de Información Federada con factor de intercambio de información adaptativo. La idea es cambiar el factor de intercambio de información de acuerdo al rendimiento de cada filtro local y por lo tanto cambiar la proporción de la información de la estimación del filtro local al filtro maestro.

3.1 Estimación de la covarianza del ruido

El funcionamiento del FIU se basa en el conocimiento de los modelos del proceso y de la medición, y las propiedades de sus ruidos. La incertidumbre en la covarianza del error de la observación (R) tiene un impacto crucial en el rendimiento del filtro. La forma convencional de determinar R , es del conocimiento a priori de los errores de medición, que en general se hace de un análisis empírico. En la práctica este valor no siempre se mantiene constante ya que puede ser afectado por el medio ambiente, fallas en los sensores, etc.

De manera de aumentar la precisión de la estimación y manejar las variaciones del ruido a través de la estimación en tiempo real cada filtro local, utilizará un filtro de Información Unscented adaptativo (FIUA). La idea es adecuar el filtro de Kalman Unscented Adaptativo a la estructura del filtro de Información Unscented, para realizar la estimación de estado.

Un filtro adaptativo basado en la evaluación secuencial de los residuos expresado como: La covarianza estimada del ruido de la medición será la varianza de la innovación calculada en un horizonte deslizante de longitud m , menos la covarianza teórica estimada, es propuesto por (Manasi y col., 2013)

La evaluación secuencial de los residuos $r_k = \varphi_k - h_k(\hat{x}_{k/k-1})$, puede ser obtenida en forma directa de la ecuación 16, y la varianza estimada de la covarianza residual en un horizonte deslizante de longitud m es calculada con la ecuación (26).

$$\hat{C}_v = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m r_{k-i} r_{k-i}^T \quad (26)$$

La covarianza de la medición se define como:

$$P_k^{yy} = E[(z_k - \hat{z}_{k-1})(z_k - \hat{z}_{k-1})^T] \quad (27)$$

y puede ser aproximada

$$P_k^{yy} \approx H P_k H^T \quad (28)$$

Entonces, la covarianza estimada del ruido de la medición es calculada con la ecuación (29).

$$R = \left[\text{diag} \left(\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m r_{k-i} r_{k-i}^T - P_k^{yy} \right) \right] \quad (29)$$

Una de las dificultades del enfoque residual es que la matriz R debe ser definida positiva, para garantizar esto todos los elementos de R , son forzados a ser positivos, tomando el valor absoluto de la covarianza estimada. Entonces, el valor estimado de R es usado en la actualización de la medición, al tiempo $k+1$.

3.2 Filtro Federado Adaptativo

El factor de intercambio de información juega un importante rol en determinar el rendimiento del FKF. Existen diferentes enfoques para especificar el factor de intercambio de información, las ventajas y desventajas de cada modo son discutidas por (Carlson 1988). Cuando los factores de intercambio de información son fijados como $\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_{N+1} = 1/(N+1)$ se ha observado de los resultados de simulaciones que la estimación global ofrece la mejor precisión cuando no hay cambios en las perturbaciones de los sistemas locales.

En las aplicaciones prácticas, las condiciones de los subsistemas pueden verse alteradas en gran medida con el tiempo. Estos cambios no pueden ser reflejados si los factores de intercambio de información están fijos resultando en el deterioro del rendimiento de los filtros de Kalman asociados. Cuanto mayor sea el factor de intercambio de información mayor será la influencia del subsistema en la estimación global. La idea es cambiar el factor de intercambio de información de acuerdo al rendimiento de cada filtro local y por lo tanto cambiar la proporción de la información de la estimación del filtro local al filtro maestro usando los autovalores de la matriz de covarianza P_i idea presentada por (Zhang y col., 2002)

Con este fin se utilizará la información de los autovalores de las matrices de covarianza P_i de cada filtro local, ya que ellos representan las covarianzas de sus correspondientes vectores de estado. Cuanto mayor es el autovalor de P_i mayor es la covarianza de la estimación del estado correspondiente y por lo tanto peor es su rendimiento. La matriz de la covarianza del filtro local i , puede ser descompuesta en: $P_i = L \Lambda_i L^T$, donde $\Lambda_i = \text{diag} \{ \lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{im} \}$; $\lambda_{i1} \sim \lambda_{im}$ son los autovalores de P_i y L es su correspondiente autovector. Como los autovalores pueden ser positivos o negativos se utilizará $P_i P_i^T$ en vez de P_i en la descomposición. Entonces el factor de intercambio de información será definido como:

$$\beta_i = \frac{\text{tr} \Lambda_i}{\sum_{i=1}^{N+1} \Lambda_i} \quad (37)$$

donde $\text{tr} \Lambda_i$ es la traza de la matriz Λ_i

4 Resultados y discusión

Con el fin de simular el comportamiento del proce-

so, el modelo riguroso de la columna fue empleado. En cada período de tiempo, las temperaturas de las etapas 5, 7, 8, 9 y 10, fueron utilizadas como entradas al filtro. Todas las simulaciones fueran hechas en el ambiente de programación MATLAB. En este trabajo se comparó el rendimiento de tres filtros, el filtro de Información en arquitectura centralizada (FIC), el filtro de Información en arquitectura Distribuida (FID) y el filtro de Información Adaptativo en una arquitectura Federada (FIAF). En el FIC las señales de los 5 sensores son alimentadas al filtro. En el FID y el FIAF, las señales de los sensores son alimentadas por pares a cada filtro individual o filtro local (5;10), (8;10), (7;10) y (9;10) de acuerdo a la arquitectura de la figura 1 y 2. Se utilizó como sensor de referencia (z_r) el sensor de la etapa 10, correspondiente al rehervidor por ser la etapa que tiene una dinámica de respuesta más rápida y por lo tanto las mediciones son más sensibles durante todo el periodo de destilación (Zamproga y col., 2005).

La respuesta de los filtros será evaluada en diferentes escenarios con falla en el sensor de temperatura de la etapa 9, como se representa en la figura 3. En el primer escenario representado por la figura 3a, se estudia una falla de desviación, donde los errores de precisión aumentan con el tiempo en el momento que la simulación alcanza el minuto 100. En el segundo escenario, una falla de congelación es considerada, la señal del sensor permanece constante con ruido gaussiano a partir del minuto 100. En el tercer escenario, se evalúa una falla de sesgo donde la señal medida se desplaza de su valor real como se representa en la figura 3c.

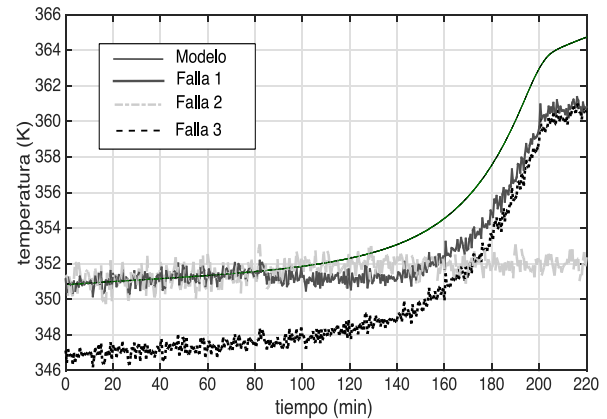


Fig.3. Fallas en el sensor 9: a) Desviación partir del minuto 100, línea negra b) Congelación c) Sesgo, línea gris a trazos. Línea continua temperaturas de referencia.

En la figura 4 se muestran los resultados de la estimación de las composiciones para tres etapas de la columna, con falla tipo 2. Se puede ver como la precisión de la estimación varía de acuerdo al enfoque de filtrado. Mientras que la estimación con el FIC, casi inmediatamente después del momento del fallo del filtro, no puede seguir el estado real, el FID presenta una desviación con respecto al estado real, mientras que el FIAF es casi in-

variante a la alteración introducida, haciendo que la estimación tenga el mismo comportamiento que el estado real, en todas las etapas.

La tabla 1 reporta la suma del error porcentual medio absoluto (EPMA) de la estimación de la composición de las etapas, de las pruebas realizadas para los diferentes escenarios, de manera de cuantificar el desempeño de los estimadores, corroborando los resultados de la figura 4.

En el escenario 1, el error de estimación del FIAF en promedio es 32% menor que el FIC. En el escenario 2 y 3, se evidencia la superioridad del FIAF con respecto al FIC y FID. El error del FIC excede en más de un 100% al FIAF.

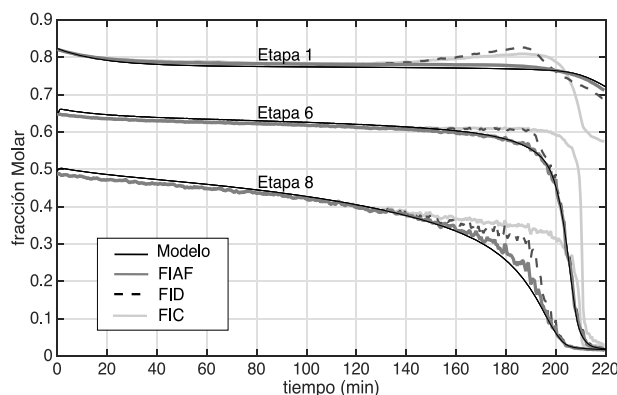


Fig. 4. Estimación de la fracción molar con falla 2, sensor 9. Filtros FIC, FID y FIAF

Tabla 1. EPMA en la estimación de la composición.

	EPMA		
	E1	E2	E3
FIC	0.1533	0.2625	0.3637
FID	0.1308	0.2177	0.1526
FIAF	0.1161	0.0993	0.1235

5 Conclusiones

La implementación y rendimiento de la solución estándar del filtro de Información Unscented en arquitectura centralizada y descentralizada es comparada con el filtro propuesto bajo una estructura Federada Adaptativa. Los algoritmos de filtrado fueron usados para la estimación del estado de una columna de destilación por lote a partir de datos reales de la columna. Los resultados confirman que el FIAF, con factores de intercambio de información adaptativo, es capaz de incrementar la robustez del filtro contra variaciones en la señal de medición y fallas en los sensores mejorando de manera significativa la precisión de la estimación.

Referencias

Carlson NA, 1988, Information-sharing approach to federated Kalman filtering, In Proc. IEEE National Aerospace and Electronics Conf., pp. 1581-1586
Deok-Jin Lee, 2008, Nonlinear Estimation and Multiple Sensor Fusion Using Unscented Information Filtering,

IEEE signal processing letters, Vol.15, pp. 861-864
Edelmayer A, Miranda M, 2011, Federated Filtering Revisited: New Directions to Distributed Systems Estimation and Filtering- a Case Study, Acta Technica Jaurinensis, Vol.4. No.3, pp. 365-391
Jonghee B, Youdan Kim, 2010, Attitude Estimation for Satellite Fault Tolerant System Using Federated Unscented Kalman Filter, Int'l J. of Aeronautical & Space Sci. Vol 11(2), pp. 80-86
Julier S, Uhlmann J, Durant-White H, 1995, A new Approach for filtering Nonlinear Systems, In Proceedings of the American Control Conference, pp. 1628-1632
Liu G, Wörgötter F, Markelic I, 2011, Nonlinear estimation using central difference information filter. In IEEE Workshop on Statistical Signal Processing, pp.593-596.
Manasi D, Sadhu S, Ghoshal T, 2013, An Adaptive Sigma Point Filter for Nonlinear Filtering Problems, International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering, Vol.2, No.2, pp. 13-19
Miranda M, Edelmayer A, Encinoza A, 2011, Case study of Unscented state estimation for batch distillation processes, in Proc. IEEE Int. Conf. Cont., ICCA'11, pp. 919-924.
Mujtaba I, 2004, Batch Distillation: Design and Operation. Series on Chemical Engineering, Vol. 3, Imperial College Press, London
Perry JH, 1967, Perry's Chemical Engineer's Handbook. 7 ed. McGraw-Hill., pp-320-330
Wan ER, Van der Merwe R, 2000, The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation, In Proceedings of Symposium on Adaptive Systems for Signal Processing Communication and Control, pp.153-158
Yu CC, Luyben WL, 1987, Control of multicomponent distillation columns using rigorous composition estimators. Int. Chem. Eng. Symp. Series, Vol.104, pp. 29-69.
Zamprognia E, Barolo M, Seborg D, 2005, Optimal selection of soft sensor inputs for batch distillation columns using principal component analysis, Journal of Process Control, Vol.15, pp. 39-52
Zhang HB, Lennos P, Goulding Y, Wang, 2002, Adaptive Information sharing factors in Federated Kalman Filtering, 15th Triennial World Congress, IFAC, pp-211-220

Miranda, Moira: Profesor Asociado de la Escuela de Ingeniería Química (ULA). Ingeniero Químico (ULA, 1998). Doctor en Ingeniería de Procesos de la Universidad de Pau (Francia, 2005).

Méndez, Dayana: Ingeniero Químico, Universidad de Los Andes (ULA, 2006). MSc. en Automatización e Instrumentación (ULA, 2016). Correo electrónico: daynamen@ula.ve

Rigoberto Flores. Ingeniero Químico (ULA, 2016). Correo electrónico: rigoflores85@gmail.com

Capítulo 38

Formulación de una emulsión O/W a base de eugenol para aplicación como anestésico tópico y bucal utilizando el método de transición de fases

Cedeño, Yleana²; Segovia, Leonel²; Dávila, Rafael²; Pérez, Albany²; Sulbarán, Betzabeth²; Gómez, Rubén²; Izaguirre, César²; Bullón¹, Johnny; Rennola¹, Leonardo; Márquez, Ronald^{1*}

¹Laboratorio FIRP, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes.

²Laboratorio de Alimentos, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes.
Mérida-Venezuela

*marquezronald@ula.ve

Resumen

*Las emulsiones son sistemas formados por dos fases, una de las cuales se encuentra dispersa en la otra en forma de gotas. Éstas tienen múltiples aplicaciones, entre ellas, en la formulación de productos farmacéuticos y cosméticos. Su preparación requiere la generación de una gran área interfacial, la cuál se obtiene haciendo uso del saber-hacer de formulación fisicoquímica de sistemas surfactante-aceite-agua. Entre las aplicaciones en la industria farmacéutica resaltan: cremas tópicas para la aplicación de fármacos, emulsiones para administración intravenosa y emulsiones para administración de medicamentos vía oral. En este trabajo se obtienen emulsiones a base de eugenol para ser utilizadas como anestésico tópico y bucal. El eugenol fue extraído del clavo de olor (*Syzygium aromaticum*) por diversos métodos, entre ellos, destilación por arrastre con vapor, hidrodestilación y extracción Soxhlet. Las emulsiones fueron preparadas con una mezcla de surfactantes no iónicos Span 20/Tween 80 a un HLB de 11 a 13 y a una concentración total de surfactante de 4%, utilizando el método de transición de fases por dilución. Este método es generalmente usado para obtener nanoemulsiones. La relación aceite de parafina/eugenol fue de 4/1 para alcanzar un contenido de fase interna final de la emulsión de 10% con un 4% de surfactante y 86% de fase acuosa. El polímero utilizado como viscosante fue carboximetilcelulosa. En estas condiciones, se logró obtener una emulsión con tamaño de gota promedio menor a 2 μm , con características de anestésico local tópico y bucal, utilizando un componente activo natural, el eugenol.*

ISBN: 978-980-11-1858-9



9 789801 118589

1 Introducción

Las nanoemulsiones son sistemas dispersos no equilibrados de dos líquidos inmiscibles con tamaño de gota submicrométrico (Forgiarini y col., 2001). La mayoría de los sistemas formulados para producir nanoemulsiones son sistemas multicomponente, por lo tanto, debido al fenómeno de partición de las especies de surfactante en estos sistemas, es posible modificar la composición interfacial durante el proceso de emulsión a través del cambio de las proporciones de agua y aceite (Márquez y col., 2002, Salager y col., 2004). Este es el principio del método de emulsión inicialmente denominado punto de inversión de la emulsión (EIP en sus siglas en inglés) descrito por Marszall (1976), usado por Lin (1978) y mejorado por Sagitani (1992). El método para obtener nanoemulsiones del tipo aceite en agua (O/W) consiste en la adición de agua a una dispersión formada por el aceite y el tensoactivo hasta obtener la emulsión submicrométrica final. La importancia de la presencia de una microemulsión y/o fases de cristales líquidos lamelares para la formación de nanoemulsiones, a través de métodos de inversión de fase por dilución, se ha discutido en trabajos anteriores (Forgiarini y col., 2001; Bullón y col., 2007; Márquez y col., 2008). La generación de estas estructuras tales como microemulsiones o cristales líquidos en sistemas surfactante-aceite-agua (SOW) depende de la formulación fisicoquímica, y particularmente, del parámetro de formulación del surfactante, el cual puede ser expresado como el HLB o balance hidrofílico lipofílico (Salager, 2000; Márquez y col., 2016A).

Bullón y col. (2007) y Márquez y col. (2008) obtuvieron emulsiones de aceite de soja en agua estabilizadas por medio de emulsionantes tales como ésteres de sorbitan etoxilados y no etoxilados y lecitina, a través del método de transición de fase por dilución. En ambos casos se observó la presencia de cristales líquidos lamelares. Estas microestructuras permiten obtener emulsiones de tamaños de gotas submicrométrico, luego de las transiciones de fase durante la dilución.

La elaboración de productos micro o nanoestructurados en el campo farmacéutico es importante, debido a que estos poseen una gran área interfacial y pueden ser utilizados para la administración controlada de principios activos, como aquellos presentes en aceites naturales. El Eugenol es un aceite esencial presente en el clavo de olor (*Syzygium aromaticum*). Alrededor del 80,7% del aceite esencial de clavo de olor está compuesto por Eugenol, además, contiene otros compuestos como acetato de eugenol (14,8%), β -carofileno (4,1%), y ácido oleanólico triterpeno (3,2%). La extracción de Eugenol se realiza a través de diferentes métodos de separación, entre ellos, los más utilizados son la destilación por arrastre con vapor, hidrodestilación y extracción Soxhlet (Ocampo 2008, Guarnizo y col., 2009). Este se utiliza

clínicamente como anestésico local y antiséptico, específicamente en el tratamiento de enfermedades periodontales, debido a su acción antiséptica y anti-inflamatoria (Cantatore 2006). A pesar de que su aplicación es común, el Eugenol puede llegar a provocar lesiones cáusticas o quemaduras superficiales cuando es colocado en forma directa y en altas concentraciones en los tejidos blandos. El Eugenol puro en concentraciones mayores de 10^{-4} mmol/mL (> 600 mg/ml) produce la inhibición de la migración celular y modifica la síntesis de las prostaglandinas, lo que afecta la respiración celular, la actividad mitocondrial y produce severos cambios en la actividad enzimática de la membrana celular. Por esta razón, se han utilizado diversos vehículos para su aplicación (González 2002).

En este estudio se utiliza el eugenol como principio activo en la formulación de una emulsión con acción tópica antiséptica y anestésica, compuesta por aceite de parafina, eugenol, agua y una mezcla de surfactantes no iónicos, utilizando un método de emulsión de transición de fases de baja energía. La ejecución del producto se realizó en el curso Fisicoquímica para Ingenieros Químicos, a través de la aplicación de la “Reproducción de un Ambiente de Innovación en el Salón de clase” (Márquez y col., 2016B).

2 Metodología

2.1 Sustancias

Los surfactantes usados en este trabajo son una mezcla de dos agentes tensioactivos no-iónicos del tipo ésteres de sorbitan no etoxilados y etoxilados, conocidos comercialmente como Span 20 y Tween 80, respectivamente. El Span 20 es una mezcla de ésteres de sorbitán del tipo monolaurato con un peso molecular promedio de 346 g/mol, una densidad de 0,95 g / ml a 25° C y un HLB de 8,6. El Tween 80, también conocido como polisorbato 80, está constituido por un anillo de sorbitán del tipo monooleato y por polióxido de etileno con un peso molecular promedio de 1310 g/mol y un HLB de 15. Ambos surfactantes fueron obtenidos de Sigma (España). La fase oleosa fue parafina líquida y el polímero viscosante carboximetilcelulosa, ambos proporcionados por Científica Andina (Venezuela). El electrolito fue cloruro de sodio (JT Baker, México, grado analítico). El componente activo eugenol fue extraído del clavo de olor (*Syzygium aromaticum*), a través de destilación por arrastre de vapor, hidrodestilación y extracción Soxhlet. En la Figura 1 se presentan esquemáticamente las estructuras moleculares del eugenol, Span 20 y Tween 80.

2.2 Extracción del eugenol

La extracción de Eugenol se realizó a través de tres métodos:

- Destilación por arrastre con vapor: Este proceso consiste en co-distilación (o arrastre) del aceite esencial con vapor de agua en un equipo de destilación simple. En este, la muestra vegetal, es colocada en una cámara inerte y sometida a una corriente de vapor de agua sobrecalentado, donde, los aceites esenciales que poseen altos puntos de ebullición son destilados y posteriormente condensados, recolectados y separados de la fracción acuosa.

- Hidrodestilación: Esta es una variante del método simple de la destilación por arrastre con vapor. La materia prima vegetal es cargada en un hidrodestilador, de manera que forme un lecho compactado. El vapor de agua es inyectado con la presión suficiente para vencer la resistencia hidráulica del lecho. El vapor entra en contacto con el lecho de clavos de olor, para calentarlo y liberar el aceite esencial contenido, el cual, a su vez se evapora. En este equipo se coloca una trampa al final del refrigerante, la cual va separando el aceite del agua condensada, con lo cual se mejora y facilita la extracción del aceite esencial.

- Extracción Soxhlet: En este método el sólido que se va a extraer se coloca en un cartucho hecho de papel de filtro, el cual se inserta en el centro de la cámara. Un solvente de bajo punto de ebullición, se coloca en el balón y se calienta hasta mantener un reflujo constante. Los vapores suben hacia el condensador y el líquido condensado cae dentro del cartucho que contiene al sólido. El solvente comienza a llenar la cámara y extraer el compuesto deseado a partir del material vegetal. Una vez se llena el cartucho con el solvente, otro tubo de menor diámetro, genera un vacío que arrastra el solvente con el aceite hasta el balón de destilación.

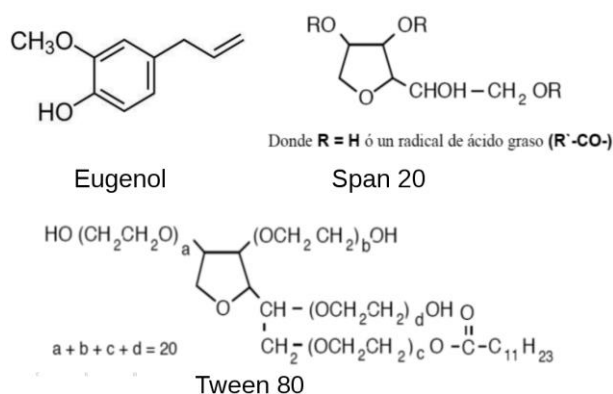


Figura 1. Estructuras moleculares del eugenol, Span 20 y Tween 80.

2.3 Formación de la emulsión

El procedimiento de emulsión se llevó a cabo como sigue: la mezcla de surfactantes Span 20 y Tween 80 fue disuelta primero en la fase aceite, con una relación de aceite de parafina/eugenol de 4/1 y una relación fase aceite/surfactante de 2,5/1. La fase acuosa (0,06% de NaCl) se añadió poco a poco a la dispersión de agente tensioactivo-aceite (0,7 ml/min), manteniendo una velocidad de mezclado (250 rpm) y temperatura (30°C) constantes. El mezclador usado fue un agitador IKA, modelo Eurostar. Después se diluyó la fase viscosa en el agua restante necesaria para obtener 50 g de la emulsión final compuesta por 4% de surfactante, 10% de fase aceite (parafina + eugenol) y 86% de agua.

2.4 Tamaño de gota

El tamaño medio de gota y distribución de tamaño de gota se determinaron utilizando un analizador de tamaño de partícula de difracción de luz láser LS 13320 (Beckman Coulter), con un rango de medición de 0,04 a 2000 μm . Las mediciones se llevaron a cabo por dilución de las muestras con la fase acuosa utilizada en la preparación de la emulsión. El tamaño medio de gota reportado es el diámetro Sauter $d[3,2]$, además, se presenta el $d(0,9)$, el cual es el diámetro por debajo del cual se encuentra el 90% en volumen de las gotas de la distribución.

2.5 Comportamiento reológico

Se utilizó un reómetro rotacional (TA instruments), modelo ARG2, para realizar las medidas de viscosidad de las emulsiones formadas. Se obtuvieron datos de la curva esfuerzo vs. tasa de corte para una geometría cono-plato o cilindros concéntricos, de acuerdo al comportamiento de flujo de las emulsiones.

2.6 Análisis sensorial

El efecto anestésico de las emulsiones con el componente activo eugenol fue estudiado a través de pruebas de análisis sensorial, aplicando la emulsión tópicamente sobre la piel y en el interior de la boca, y determinando el tiempo de efecto anestésico sobre la zona.

3 Resultados y Discusión

El análisis de los métodos de extracción del eugenol se realizó tomando en cuenta los rendimientos de los tres métodos empleados. El procedimiento de extracción del eugenol por arrastre con vapor se llevó a cabo en cuatro horas aproximadamente, obteniendo un rendimiento de 37,5%. La técnica por hidrodestilación, presentó una duración de dos horas aproximadamente,

siendo el rendimiento obtenido de 9,3%. La extracción Soxhlet, se completó en tres días aproximadamente, con un rendimiento de 36,3%. Por ser una extracción del tipo sólido- líquido, en este último existió un arrastre partículas sólidas y pigmentos de otros compuestos indeseados para el estudio. Por otro lado, no fue posible separar exitosamente el eugenol de otros compuestos ya que poseen puntos de ebullición muy similares. Como consecuencia de los parámetros estudiados, tales como: tiempo, rendimiento y pureza del aceite, los métodos seleccionados para la extracción de eugenol del clavo de olor fueron la destilación por arrastre con vapor e hidrodestilación (Guarnizo y col., 2009).

El tamaño de gota de las emulsiones compuestas por 4% de la mezcla de surfactantes Span 20 y Tween 80, 8% de aceite de parafina, 2% de eugenol y 86% de fase acuosa, realizando un barrido de HLB 11 a 13 se presentan en la Figura 2. En HLB = 12,5 se observa un mínimo de tamaño de gota de las emulsiones formadas, que es el comportamiento característico de los sistemas SOW a cierta distancia de la formulación óptima (Salager 2000). A HLB = 12,5 el $d[3,2]$ y $d(0,9)$ son similares, lo que indica que esta emulsión es la menos polidispersa. Esto genera una mayor estabilidad de las emulsiones, la cual es mejorada con los siguientes factores: 1) un menor tamaño gota, por un aumento del área interfacial e incremento de las interacciones de repulsión electrostática y estérica; 2) una distribución de tamaño de gota menos polidispersa; y 3) la viscosidad de la fase externa, la cual puede ser incrementada con un agente viscosante.

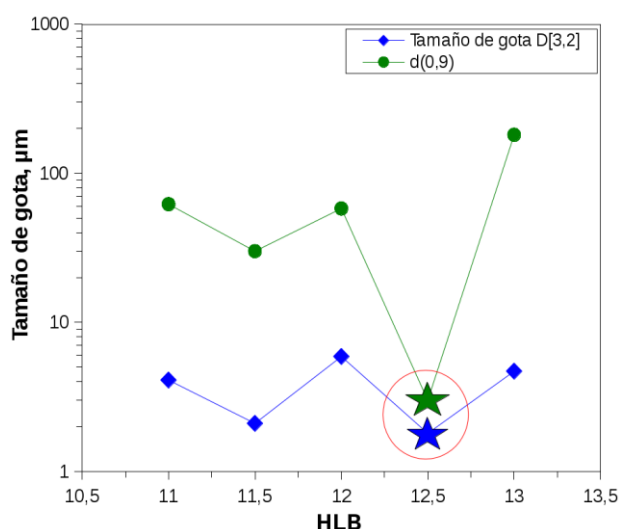


Figura 2. Tamaño de gota promedio $d[3,2]$ (◆) y $d(0,9)$ (●) de emulsiones del sistema aceite de parafina/eugenol/Span 20-Tween 80/Fase acuosa en función del HLB. T = 30 C.

El eugenol es un aceite polar, lo que hace que su

emulsión generalmente sea difícil debido a su baja solubilización en sistemas SOW. La mezcla de surfactantes Span 20 y Tween 80 se ha demostrado que es adecuada para la emulsión de aceites polares, tales como aceites triglicéridos (Bullón y col., 2007). El diámetro de gota inferior a 2 μm obtenido de las emulsiones a un HLB = 12,5 demuestra que esta formulación permite encapsular eugenol en la emulsión, convirtiéndolo en un vehículo adecuado para su aplicación, debido a que este aceite en su estado puro puede ser tóxico y generar irritación al aplicarlo directamente sobre la piel o en la boca para anestesia local, particularmente en odontología.

En HLB = 11 se obtuvo una emulsión inestable opaca debido a la proximidad del punto de inversión de fase (Salager 2000). Por esta razón, los HLB de 12, 12,5 y 13 fueron seleccionados para el estudio de la relación entre el comportamiento reológico y tamaño de gotas de las emulsiones formadas.

En la figura 3 se presenta el comportamiento reológico de las emulsiones formadas a HLB 12, 12,5 y 13. Se observa que las emulsiones tienen un comportamiento reofluidizante. Se puede resaltar, que una formulación adecuada de una emulsión anestésica para aplicación tópica requiere de:

- Alta viscosidad a bajo cizallamiento para una mejor aplicación.
- Baja viscosidad a alto cizallamiento para extender la crema sobre la piel.
- Humectabilidad y efecto anestésico por varios minutos.

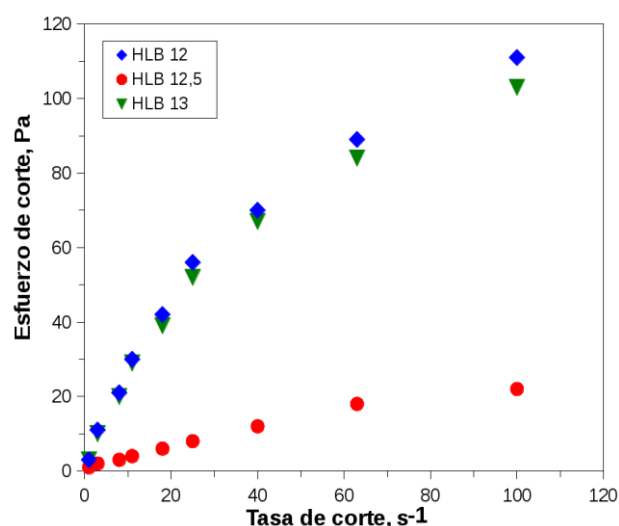


Figura 3. Comportamiento reológico de emulsiones del sistema aceite de parafina/eugenol/Span 20-Tween 80/Fase acuosa, en función del HLB. T = 30 C.

Las dos primeras características fueron mejoradas para las tres emulsiones mostradas en la figura 3, utilizando el polímero carboximetilcelulosa como agente viscosante en un 3% con respecto al sistema total. Se ha determinado que este polímero puede ser utilizado en emulsiones O/W, modificando el comportamiento reológico e incrementando la estabilidad de las emulsiones formadas (Celis y col., 2008). La tercera de ellas, el efecto anestésico fue estudiado a través de un análisis sensorial de la emulsión aplicada tópicamente sobre la piel y en la boca. Se encontró que la emulsión tiene un efecto luego de 2 min de ser aplicada, con una duración de 20 ± 1 min desde su inicio hasta el momento en que la zona obtiene sensibilidad nuevamente.

4 Conclusiones

Se logró obtener una formulación para el uso del eugenol como anestésico tópico y bucal, respetando los límites de toxicidad del mismo, empleando una emulsión como vehículo, la cual fue obtenida por el método de transición de fases por dilución. Se encontró que los métodos más convenientes para extraer el eugenol del clavo de olor (*Syzygium aromaticum*) son la destilación de arrastre con vapor e hidrodestilación. La estabilidad, el tamaño de gota y las propiedades reológicas de la emulsión permiten la aplicación del eugenol como principio activo para su uso como anestésico tópico y bucal.

Agradecimientos

A todo el personal técnico y de laboratorio del Laboratorio FIRP, Laboratorio de Alimentos y Laboratorio LMSSI de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes que contribuyeron en el desarrollo de esta investigación.

Referencias

Bullón J, Molina J, Márquez R, Véjar F, Scorzza C, Forgiarini A, 2007, Nano-emulsification of triglyceride oils for parenteral use by mean of a low-energy emulsification method. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 30 (Especial), 428-436.
Cantatore G, 2006, Estudio de la biocompatibilidad de los cementos endodoncicos. *Dentsply noticias*.1-3.
Celis, Maria T, Manchego L, Contreras M, Forgiarini A, Vejar F, Márquez L, Salager JL, 2008, Efecto del polímero carboximetil celulosa de sodio sobre la inversión de emulsiones. *Ciencia e Ingeniería*, 29(2), 115-122.
Forgiarini A, Esquena J, González C, Solans C, 2001, Formation of nanoemulsions by low-energy emulsification methods at constant temperature, *Langmuir* 17, 2076-2083.

Gonzales R, 2002, Eugenol: Propiedades farmacológicas y Toxicológicas. *Revista cubana de Estomatología*, 39, (2), 139-156.

Guarnizo A, Martínez P, 2009, Experimentos de química orgánica con enfoque en ciencias de la vida. Ediciones Elizcom, Armenia, 65-69.

Lin TJ, 1978, 'Low-energy emulsification I: Principles and applications', *J Soc. Cosmet. Chem.* 29, 117-125.

Márquez N, Graciaa A, Lachaise J, Salager JL, 2002, 'Partitioning of Ethoxylated Alkylphenol Surfactants in Microemulsion-Oil-Water Systems: Influence of Physicochemical Formulation Variables', *Langmuir* 18 (16) 6021-6024.

Márquez R, Bullón J, Márquez L, Cárdenas A, Briceño M, Forgiarini A, 2008, 'Rheological changes of parenteral emulsions during phase-inversion emulsification', *Journal of Dispersion Science and Technology* 29 (4/24), 621-627.

Márquez R, Bullón J, Forgiarini A, 2016A, Doble efecto de formulación producido por un alto porcentaje de alcohol en sistemas aceite/dodecil sulfato de sodio/pentanol/agua y posible alteración del EACN del aceite. *Ciencia e Ingeniería*, 37(2), 97-104.

Márquez R, Tolosa L, Gómez R, Izaguirre C, Rennola L, Bullón J, Sandia B, 2016B, Reproducción de un ambiente de innovación en el salón de clase. Una estrategia para promover la creatividad en la educación en Ingeniería Química. *Educación Química*, 27, 249-256.

Marszall L, 1976, 'Adsorption of nonionic surfactants at the oil-water interface and emulsion inversion point', *Colloid & Polymer Sci.* 254, 674-675.

Ocampo R, Rio L, Betancurt L, Ocampo D, 2008, Curso Práctico de Química Orgánica enfocado a biología y alimentos. Editorial Universidad de Caldas.

Sagitani H, 1992, Phase-Inversion and D-Phase Emulsification, en: 'Organized Solutions', S.E. Friberg y Lindman B, Editores, Marcel Dekker, New York.

Salager JL, 2000, Emulsion properties and related know-how to attain them, in F. Nielloud and G. Marti-Mestres, eds, 'Pharmaceutical Emulsions and Suspensions', Vol. 105 of *Drugs and Pharmaceutical Science*, Marcel Dekker, New York, EE.UU., chapter 3, pp. 73-125.

Salager JL, Forgiarini A, Marquez L, Pena A, Pizzino A, Rodriguez MP, Rondon-Gonzalez M, 2004, Using emulsion inversion in industrial processes. *Advances in colloid and interface science*, 108, 259-272.

Márquez, Ronald: Ingeniero Químico de la Universidad de los Andes (Merida-Venezuela). Actualmente se encuentra realizando estudios Doctorales en el área de *Reología Interfacial en aplicaciones de Deshidratación de crudo y Recuperación mejorada de petróleo*. Es profesor de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de los Andes e investigador del Laboratorio FIRP desde hace más de 10 años.

Cedeño, Yleana; Segovia, Leonel; Dávila, Rafael; Pérez, Albany; Sulbarán, Betzabeth: son estudiantes de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de los Andes.

Gómez, Rubén: Director del Laboratorio de Alimentos y Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de los Andes desde hace más de 25 años. Correo electrónico: rcgomez@ula.ve

Izaguirre, César: Investigador del Laboratorio de Alimentos de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de los Andes. Correo electrónico: cmi-zag@ula.ve

Bullón, Johnny: Ingeniero Químico de la Universidad de los Andes (Mérida-Venezuela) y Ph.D. del European Membrane Science and Technology Institute en la Universidad Montpellier 2 (Francia). Actualmente es profesor de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes y director del Laboratorio FIRP, con líneas de investigación en el campo de membranas y procesos de separación relacionados con sistemas con surfactantes y emulsiones. Correo electrónico: jbullon@ula.ve

Rennola, Leonardo: Profesor de Evaluación de Proyectos y Diseño de Plantas. Director del Laboratorio de Mezclado, Separación y Síntesis Industrial e investigador asociado al Laboratorio FIRP de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de los Andes, con áreas de investigación en tratamiento de aguas a través de membranas y coagulación con polímeros. MSc en Colorado State University (USA). Correo electrónico: leonardo@ula.ve

Capítulo 39

Comparación de tecnologías de propulsión aplicables al transporte vehicular particular en Venezuela

Contreras Cordero, Francisco¹; Maan Di Campli, Freddy¹; Guzmán Arguis, Víctor²; Romero Quintini, Juan^{1*}

¹Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar, Caracas, 1080-A, Venezuela.

²Departamento de Electrónica y Circuitos, Universidad Simón Bolívar, Caracas, 1080-A, Venezuela.

*juanromero@usb.ve

Resumen

Motivado por el aumento de las emisiones de gases contaminantes provenientes del parque automotor urbano, la eventual crisis energética generada por la creciente demanda de combustibles fósiles no renovables y la situación de uso extensivo de transporte particular a gasolina en Venezuela, el objetivo en el presente trabajo es evaluar la posible aplicación de distintas tecnologías de propulsión al sistema de transporte particular en Venezuela, que representen posibles mejoras de eficiencia y sustentabilidad. Cada país tiene realidades energéticas, geográficas, ambientales, económicas, sociales y de infraestructura diferentes, por eso las soluciones aplicadas para mejorar la sustentabilidad del sistema de transporte pueden ser distintas. Este trabajo se inicia con una investigación de las plataformas automotrices para transporte particular existentes a nivel mundial, alternativas al vehículo de combustión interna de gasolina. Luego se limita el estudio a las plataformas que más se adaptan a la realidad de Venezuela. Posteriormente se establece una serie de criterios técnicos, ambientales y económicos con el propósito de lograr una comparación amplia entre las plataformas. Se estima la eficiencia energética conocida como Pozo a Rueda ("Well-To-Wheels"), las emisiones de CO₂ involucradas en el funcionamiento, el costo inicial y el costo operativo de cada plataforma. Finalmente, dado que están presentes distintos tipos de indicadores, se realiza una comparación global mediante un proceso de normalización de los indicadores. Este proceso arroja un puntaje final que indica cuán cerca está cada plataforma de una plataforma de propulsión para transporte vehicular particular 'ideal' para nuestro país.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

Existe gran preocupación a nivel mundial con respecto a los efectos que genera sobre el medio ambiente la emisión de gases contaminantes. Aproximadamente 30% de estos gases provienen del sistema de transporte (Ehsani y col., 2005). Además, se vislumbra a mediano plazo una crisis energética debido a la creciente demanda y dependencia hacia combustibles fósiles y la disposición limitada de estos (Evans 2007). Por dichas razones se están desarrollando y evaluando a nivel mundial tecnologías de propulsión alternativas para los vehículos de transporte terrestre, que representen soluciones sustentables ante dichos problemas. Esto ha resultado en una gran variedad de sistemas de propulsión. Algunos han sido aplicados a nivel comercial, otros sólo han sido estudiados en laboratorios (Ehsani y col., 2005). Cada país del mundo posee realidades energéticas, geográficas, ambientales, económicas y de infraestructura diferentes. Por ello es lógico pensar que las soluciones aplicadas para mejorar la sustentabilidad del sistema de transporte pueden ser distintas.

El transporte con vehículos particulares está creciendo en gran proporción y así su participación en la cuota de emisiones contaminantes (Guzzella y col., 2007). En el presente trabajo son presentadas una investigación y una comparación de las diferentes tecnologías de propulsión de vehículos particulares. El objetivo es evaluar la posible aplicación de las tecnologías de propulsión al sistema de transporte en Venezuela. Con esto se pretende desarrollar una propuesta preliminar para mejorar a corto y mediano plazo el sistema de transporte particular en Venezuela, que responda a las necesidades y consideraciones energéticas y ambientales del mundo. Es primera vez que se realiza un estudio de esta índole para Venezuela.

2 Selección de plataformas específicas a estudiar

A continuación se definen las distintas plataformas que son objeto de estudio en el presente trabajo. La Fig. 1 muestra la plataforma convencional. Los elementos principales de esta plataforma son, el tanque de combustible, el Motor de Combustión Interna (MCI), la transmisión y las ruedas. El combustible puede ser gasolina, etanol, diesel o gas. El Vehículo Eléctrico de Batería (VEB) es una plataforma alternativa impulsada por un motor eléctrico alimentado por baterías (ver Fig. 2). El Vehículo Híbrido Eléctrico (VHE) es más complejo en el manejo de energía. Representa una combinación entre la plataforma convencional y la plataforma eléctrica de baterías (ver Fig. 3).

Esquemas específicos y más detallados de aplicaciones de plataformas eléctricas e híbridas eléctricas se presentan en (Ehsani y col., 2005, Guzzella y col., 2007, Husain 2005, Emadi 2005, Romero-Quintini 2009).

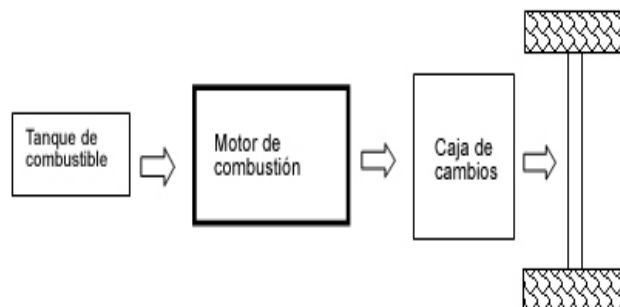


Fig. 1. Esquema de Vehículo con MCI (VCI)

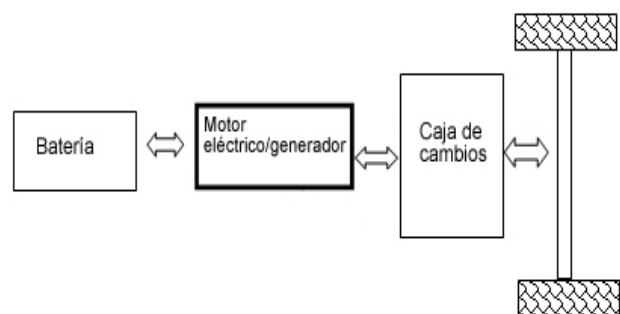


Fig. 2. Esquema de VEB

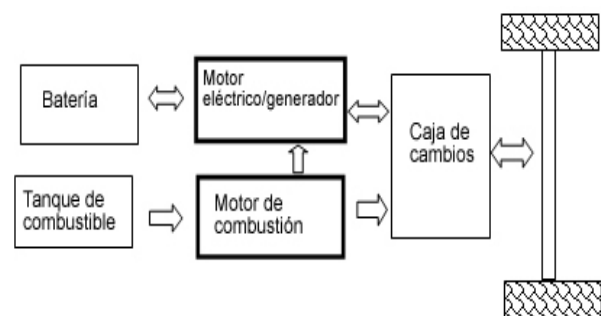


Fig. 3. Esquema de VHE

Se han planteado diversas combinaciones de fuentes de energía y trenes motrices como soluciones alternativas al Vehículo con MCI (VCI) convencional (Emadi 2005, Romero-Quintini 2009). En la tabla 1 se resumen las opciones visualizadas dentro de este estudio como posibles para analizar y comparar. En la tabla son contempladas las tres plataformas previamente presentadas, con diferentes tipos de fuentes de energía y define un modelo comercial representativo de cada opción. Algunas de las configuraciones se encuentran en niveles tempranos de desarrollo, por lo cual aún no se dispone de toda la información necesaria para un adecuado análisis comparativo de dichas plataformas. Esta investigación se limitará a comparar las plataformas de propulsión vehicular sombreadas en la tabla 1, por ser consideradas acordes a la realidad tecnológica actual de Venezuela y representar posibles opciones de corto y mediano plazo para el transporte vehicular particular.

Tabla 1. Plataformas alternativas posibles y modelos representativos (En sombreado las plataformas seleccionadas para estudio comparativo)

Tipo de Vehículo	Fuente de energía	Nivel de Aplicación	Modelo representativo
VCI	Gasolina	Comercial	Honda Civic
	Etanol	Comercial	Chevrolet Malibú
	Diesel	Comercial	Volkswagen Jetta
	Hidrógeno	Prototipos	Ford Focus
	Gas	Comercial	Honda Civic CNG
VEB	Electricidad	Prototipos y comercial	Nissan Leaf
	Electricidad	Prototipos y comercial	Honda FCX
	Hidrógeno	Prototipos y comercial	
VHE	Gasolina	Prototipos y comercial	Toyota Prius
	Gasolina + Electricidad	Prototipos	Toyota Prius Plug-in
	Etanol	Prototipos	Saab 9-3
	Diesel	Prototipos	Volvo V60 Plug-in
	Electricidad	Prototipos	
	Gas	Prototipos	Camry CNG Hybrid

3 Metodología

Se han realizado diversos estudios para evaluar el impacto energético y ambiental de VEB y otras plataformas como los Vehículos de Celdas de Combustible (VCC). Aunque los VEB y los VCC pueden no generar emisiones contaminantes en operación, hay emisiones asociadas con la producción y distribución del combustible (por ejemplo, electricidad e hidrógeno). Un estudio de los efectos ambientales y energéticos asociados a estos vehículos en comparación a los VCI, requiere un análisis completo del ciclo recorrido por el combustible. Se toma en cuenta la eficiencia de transformación de la materia prima (i.e. crudo a gasolina), el transporte del combustible desde el lugar de producción hasta los puntos de entrega al usuario, y finalmente la eficiencia del motor y transmisión (Guzzella y col., 2007, Husain 2005). En el campo del transporte este análisis se denomina “Pozo a Ruedas” (“Well-to-Wheels” o WTW). El presente trabajo utilizará este enfoque para evaluar y comparar las eficiencias y emisiones contaminantes de distintas plataformas vehiculares aplicadas a Venezuela. También, con la finalidad de establecer una comparación más amplia, se examina el costo inicial de los vehículos, los costos operativos, las implicaciones en cuanto a la infraestructura necesaria y el desempeño en autonomía de cada plataforma. Estos factores serán normalizados y ponderados para obtener un indicador global que sustente la comparación objetivo de este estudio.

4 Resultados y Análisis

A continuación los resultados de la investigación sobre la posible aplicación de plataformas de propulsión escogidas para el caso de estudio.

4.1 Análisis de fuentes de energía en Venezuela

Se analizará el caso de Venezuela respecto a las fuentes de energía. Como es bien sabido, Venezuela es

un país con reservas importantes de petróleo, de hecho es uno de los principales países exportadores del mismo, y esta actividad representa la principal fuente de ingreso del país. Además cuenta con refinerías capaces de producir gasolina y diesel. En Venezuela la gasolina y el diesel se encuentran subsidiados por el Estado, por lo cual resulta difícil establecer el verdadero precio o costo de cada litro de dichos productos dentro del país. Con motivo de establecer cifras representativas para este estudio, se toma un promedio de los precios de algunos países de América (Argentina, Brasil, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Honduras, México, Panamá, Perú y Estados Unidos) (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2016, Centralamericadata.com 2016, Globalpetrolprices.com 2016, Mytravelcost.com 2016), estimando que Venezuela podría vender dicha gasolina o diesel a un precio promedio internacional (ver tabla 2), considerándose de relevo este precio, dado que los barriles que no se empleen en Venezuela podrán venderse en el exterior a tal monto. Se utilizará el dólar como moneda internacional de referencia en las consideraciones de este estudio, ya que esto facilita la comprensión de las implicaciones económicas de la aplicación de cada plataforma tanto en Venezuela como en otros países de la región.

En Venezuela el diesel es producido según la norma Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN 1998), la cual establece un contenido de azufre de 0,5%. Se deben revisar los parámetros de producción de diesel vehicular en el país para cumplir con los estándares internacionales (aproximadamente 0,05%). Por su parte, el gas natural se obtiene de pozos gasíferos o se extrae junto con la producción de petróleo crudo. El gas natural comprimido (CNG ó “Compressed Natural Gas”) o Gas Natural Vehicular (GNV) se almacena en general en un tanque a una presión de 3.000 a 3.600 libras por pulgada cuadrada (psi). En la actualidad en Venezuela se lleva a cabo una iniciativa denominada “Autogas”. Este proyecto tiene como objetivo liberar combustible líquido (gasolinas) del mercado interno, a través de la construcción de puntos de expendio de GNV y la conversión de vehículos al sistema dual (gasolina-gas), que permitan el cambio en el patrón de consumo de combustibles líquidos a gaseosos (PDVSA 2008, 2015). El GNV en Venezuela se encuentra subsidiado, por esto de igual manera se plantea establecer como precio de referencia el promedio entre los precios en Brasil y Colombia (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2016, Unidad de Planeación Minero Energética 2016) (ver tabla 2). Por otra parte, el etanol es un compuesto químico que puede utilizarse como combustible, bien solo, o mezclado en cantidades variadas con gasolina. La tabla 2 muestra el precio promedio del etanol en Brasil y Estados Unidos (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2016, Tradingeconomics 2016).

El parque de generación del Sistema Eléctrico Nacional Venezolano está conformado por un significativo número de infraestructuras, localizadas en su mayoría, en la región de Guayana, donde funcionan los complejos hidroeléctricos más grandes del país. Éstos ofrecen más del 62% del potencial eléctrico que llega a hogares e industrias de toda la Nación. El otro 35% de la generación de electricidad proviene de plantas termoeléctricas, y casi un 3% corresponde al sistema de generación distribuida, conformada por generadores con MCI diesel (Corporación Eléctrica Nacional 2016). En el caso de las fuentes de energía renovables, el potencial de generación de energía eólica en Venezuela es alto. La instalación de molinos eólicos agrupados en la península de Paraguaná o en la Guajira generaría electricidad en forma barata, ecológica y sustentable (Ravelo y col., 2009). Asimismo, dada su ubicación geográfica, Venezuela tiene buen potencial para el aprovechamiento de energía solar. Aunque se conocen todas estas opciones de fuentes de energía eléctrica, se eligió no entrar en detalles al respecto en este estudio y se tomó el precio promedio (U.S. Department of Energy 2016) mostrado en la tabla 2, donde también se refleja el precio de la electricidad en Venezuela, la cual alcanza un subsidio del 80%.

Tabla 2. Precios de combustibles

Combustible	Precio [\$]
Gasolina 95 [gal]	3,03
Diesel [gal]	2,82
Gas Natural Vehicular [ft ³]	0,017
Etanol [gal]	1,87
Electricidad [kWh]	0,031

4.2 Eficiencia global

Para estimar la eficiencia global “Pozo a Ruedas” se utilizan valores de eficiencia aproximados para cada proceso, tomando en cuenta la tecnología disponible actualmente. En la tabla 3 se presentan las eficiencias aproximadas de los procesos considerados en este estudio (Guzzella y col., 2007, Husain 2005, U.S. Department of Energy 2016, Kreith y col., 2003).

En la tabla 4 se presentan las eficiencias globales finales de las plataformas en estudio, resultado de la combinación de la eficiencia de los procesos involucrados en cada plataforma. En el caso de los VEB, son considerados dos escenarios de generación de electricidad, ya que según sea el esquema de generación eléctrica del país, la eficiencia global de la plataforma puede variar. En este estudio se consideran dos escenarios, en el primer escenario toda la generación se da a través del uso de plantas de generación diesel convencionales. El segundo escenario contempla la utilización de plantas de Ciclo Combinado (CC) que utilizan gas natural.

Para los modelos “Plug-in” (VHE que se pueden también recargar conectándolos a la red eléctrica) las eficiencias se estimaron tomando en cuenta el porcentaje

de autonomía eléctrica pura respecto al recorrido diario promedio de 66km.

Tabla 3. Eficiencia de procesos

Proceso	Eficiencia [%]
Refinería y Transporte (Gasolina)	86
Motor y Transmisión (Gasolina)	17
Refinería y Transporte (Diesel)	90
Motor y Transmisión (Diesel)	20
Refinería y Transporte (Etanol)	59
Motor y Transmisión (Etanol)	12
Refinería y Transporte (Gas Natural)	91
Compresión (Gas Natural)	94
Motor y Transmisión (Gas Natural)	16
Motor y Transmisión (Híbrido Gasolina)	29
Motor y Transmisión (Híbrido Diesel)	35
Generación de electricidad (Diesel)	48
Generación de electricidad (Gas Natural)	55
Transmisión a la toma residencial (Eléctrico)	94
Batería y Electrónica de potencia (Eléctrico)	80
Motor y Transmisión (Eléctrico)	90

Tabla 4. Eficiencia global para distintas plataformas

Tipo de Vehículo	Eficiencia Global [%]
VCI Gasolina	15
VCI Etanol	7
VCI Diesel	18
VCI Gas Natural	14
VEB (Escenario Plantas Diesel)	29
VEB (Escenario Plantas CC)	34
VHE (Gasolina)	25
VHE “Plug-in” (Gasolina + Plantas CC)	27
VHE “Plug-in” (Gasolina + Plantas Diesel)	26
VHE “Plug-in” (Diesel + Plantas CC)	30
VHE “Plug-in” (Diesel + Plantas Diesel)	27

Si bien es cierto que el escenario de generación eléctrica de Venezuela es mixto e incluye fuentes de generación como la hidroeléctrica (Corporación Eléctrica Nacional 2016) y la térmica de corriente continua, de las cuales se estima generan el 60% y el 35% de la electricidad nacional respectivamente. Los escenarios estudiados acá pretenden representar situaciones desventajosas de generación donde la fuente primaria sea principalmente un combustible fósil. Es válido destacar que bajo escenarios de generación de electricidad a partir de fuentes de energía como la hidroeléctrica, el viento o la energía solar, aunque implican importantes inversiones iniciales, tienen la ventaja de utilizar recursos naturales renovables, disminuyen la cantidad de combustible utilizado y disminuyen la cantidad de contaminantes arrojados a la atmósfera tales como CO₂ y NO_x.

4.3 Emisiones contaminantes

Se sabe que durante la combustión de carburantes fósiles se liberan diversos contaminantes tales como: dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x),

monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SOx), entre otros. En este estudio se consideran únicamente las emisiones de CO₂, ya que es el compuesto que influye en mayor medida al “Efecto invernadero” (Guzzella y col., 2007, Husain 2005). En la tabla 5 se presenta una estimación del número de toneladas de CO₂ arrojadas al medio ambiente por cada una de las plataformas en estudio, durante un ciclo de vida de 10 años. En el caso de los VCI se consideran las emisiones de CO₂ producto de su propio funcionamiento (MCI). Además se toma en cuenta la emisión de CO₂ en procesos como el de transporte de combustible y las emisiones asociadas al proceso de transformación de la materia prima. Por otra parte se establece, tanto para VEB como VHE, la demanda adicional de electricidad a la red y su correspondiente emisión de CO₂ en plantas de generación (Wikipedia 2016, International Energy Agency 2011).

Tabla 5. Emisiones de CO₂ en un ciclo de 10 años

Tipo de Vehículo	Fuente de energía	Emisiones de CO ₂ [Ton]	de Neta
VCI	Gasolina	57	
	Etanol	63	
	Diesel	57	
	Gas	58	
VEB	Electricidad CC	20	
	Electricidad Diesel	34	
VHE	Gasolina	34	
	Gasolina + Electricidad CC	29,5	
	Gasolina + Electricidad Diesel	32,5	
	Diesel + Electricidad CC	20	
	Diesel + Electricidad Diesel	31,5	

Observamos cómo todas las plataformas de carácter alternativo representan las plataformas con menores cantidades de CO₂ emitidos en las etapas consideradas en este estudio. El uso de los vehículos eléctricos implicaría en principio una reducción de las emisiones de CO₂ en las zonas urbanas y un aumento en menor proporción de emisiones contaminantes en las plantas de generación eléctrica, que usualmente se encuentran alejadas del casco urbano de las ciudades.

4.4 Costo inicial y de funcionamiento de los vehículos

Si bien las plataformas de propulsión planteadas pueden reducir la emisión de agentes contaminantes, éstas no podrán ser implementadas y posicionadas en el parque automotriz si no son económicamente factibles. Por esto se deben considerar los factores que incidan en la viabilidad económica de cada plataforma. Entre estos factores tenemos el costo inicial del vehículo, el costo de mantenimiento y el costo de operación.

4.4.1 Costo inicial

En la tabla 6 se presentan los costos iniciales de las plataformas en estudio estimados en base a los precios de venta sugeridos por los fabricantes en el mercado de Estados Unidos (U.S. Department of Energy 2016).

Como referencia los modelos escogidos son del año 2011, a excepción de los modelos “Plug-in” cuyo año disponible es 2012.

4.4.2 Costo de mantenimiento

En cuanto al costo de mantenimiento, en un VEB se espera sea menor que en un VCI comparable. Los VEB, dada su simplicidad, tienden a ser más confiables y requieren menor mantenimiento, dándole tendencias favorables sobre los VCI (Husain 2005). Por otra parte, los VHE contemplan un sistema de potencia complejo que involucra componentes tanto de los VCI como de los VE, por tanto se encuentran en una posición desventajosa respecto a las otras plataformas, en lo que respecta a mantenimiento.

Según un taxista que maneja un Prius en Valencia, España, el embrague dura un 100% más, y las pastillas de freno tres veces más.

Tabla 6. Costo inicial por vehículo

Tipo de Vehículo	Modelo representativo	Costo inicial del vehículo [\$]
VCI	Honda Civic	20005
	Chevrolet Malibú	21975
	Volkswagen Jetta	24095
	Honda Civic CNG	25490
VEB	Nissan Leaf	32780
VHE	Toyota Prius	22120
	Toyota Prius Plug-in	35763
	Volvo V60 Plug-in	66317

4.4.3 Costo de operación

Debemos considerar el costo operativo de cada plataforma, esto se traduce básicamente en el costo que representa conducir cada vehículo una cierta cantidad de distancia, en nuestro caso \$(/100 km). Este valor es obtenido utilizando como referencia el consumo específico en millas por galón de cada vehículo (U.S. Department of Energy 2016, Arruz 2012) que ha sido homologado por la EPA (“Environmental Protection Agency” de Estados Unidos). Además de algunas consideraciones de los patrones de manejo para cada plataforma tales como:

- Patrón de conducción 45% en autopista y 55% en ciudad.
- Recorrido anual promedio de 24000 km.
- En el caso del Toyota Prius Plug-in, dada su capacidad de recarga desde la red eléctrica, para una jornada promedio, se estima su costo de operación ponderando 27% del tiempo en modo eléctrico puro y 73% en modo híbrido gasolina.
- Para el Volvo V60 Plug-in, dada su capacidad de recarga desde la red eléctrica, su costo operativo se calcula ponderando 76% del tiempo en modo eléctrico puro y 24% en modo híbrido diesel.

Debido a la mayor eficiencia energética, las plataformas eléctricas e híbridas poseen un costo operativo menor, tal como se observa en la tabla 7.

Tabla 7. Costo operativo por vehículo

Tipo de Vehículo	Modelo representativo	Costo real final de operación [\$/100 km]
VCI	Honda Civic	7,8
	Chevrolet Malibú	11,9
	Volkswagen Jetta	6,0
	Honda Civic CNG	6,0
VEB	Nissan Leaf	2,4
VHE	Toyota Prius	4,7
	Toyota Prius Plug-in	4,2
	Volvo V60 Plug-in	3,3

4.5 Infraestructura

La implementación de nuevas tecnologías puede representar un reto en infraestructura. En este estudio se realiza un análisis principalmente cualitativo en lo que respecta a infraestructura necesaria para utilizar cada una de las plataformas en Venezuela. Entre 2002 y 2009 el parque automotor venezolano se había incrementado un 96,4 % (Cámara de Fabricantes Venezolanos de Productos Automotores FAVENPA 2009); de modo que las proyecciones para el 2015 del parque automotor eran de 4.400.000 vehículos. Si bien esta cifra no logró alcanzarse dada la falta de divisas (Ramones 2016), este valor puede considerarse como una cota superior vehicular en el quinquenio actual. La infraestructura que necesitan las plataformas cuya fuente de energía es gasolina, diesel o gas, se encuentra disponible en Venezuela, basta con mantener las expansiones necesarias en cuanto a estaciones de servicio, pues se contempla la posibilidad de una mejora, a futuro, en las divisas. La plataforma alimentada con etanol no dispone de una infraestructura de producción instalada en el país, lo cual implica realizar inversiones. Por otra parte, existe un sistema eléctrico nacional para uso industrial, comercial y residencial, sin embargo para implementar las plataformas eléctricas se debe considerar el respectivo incremento en la potencia eléctrica instalada. Si se estima un parque de 500.000 VEB, la demanda de potencia aumentaría aproximadamente 300 MW. Asimismo, los VEB dependen de la instalación de puntos de recarga de baterías públicos y residenciales. Principalmente residenciales, considerando que la tendencia puede apuntar a recargar las baterías en las noches mientras la mayoría de los usuarios duermen.

4.6 Autonomía

Los modelos escogidos se acercan a la clase sedán, y se pudo verificar que sus características de desempeño (relación peso/potencia) son parecidas. Sin embargo, dada la diferencia de la fuente de energía, es importante comparar la autonomía, que es el recorrido que puede realizar el vehículo utilizando toda la energía que puede almacenar en una recarga completa.

En la tabla 8 es mostrada la autonomía de cada modelo representativo (U.S. Department of Energy 2011, 2015, 2016, Arruz 2012, Pistoia 2010). Observe que los modelos VEB y CNG tienen las menores autonomías.

Tabla 8. Autonomía por vehículo

Tipo de Vehículo	Modelo representativo	Autonomía [km]
VCI	Honda Civic	552
	Chevrolet Malibú	414
	Volkswagen Jetta	710
	Honda Civic CNG	272
VEB	Nissan Leaf	117
VHE	Toyota Prius	858
	Toyota Prius Plug-in	864
	Volvo V60 Plug-in	1200

4.7 Reducción en consumo de combustible

Un tema de gran importancia en la presente investigación se refiere a los beneficios económicos que traería a la nación la implementación de alguna de las tecnologías analizadas. Es por esto que se realiza una comparación entre el VCI de gasolina y un VHE, con la finalidad de ilustrar las ganancias debido a la reducción en el consumo de combustible. Dado que los VHE presentan una mayor eficiencia energética frente a los VCI, es evidente que consumirán menos combustible. En la tabla 9 se presenta una estimación de la cantidad de gasolina que sería liberada del mercado interno si en un periodo de 5 años sólo 500.000 VCI fuesen reemplazados por VHE (13% del parque automotor para el año 2015). Se reduciría el consumo del mercado interno en aproximadamente 497 millones de galones de gasolina, bajo las condiciones antes mencionadas. Lo que se traduce en un ahorro aproximado de 1.860 millones de dólares, estimando un precio por galón de gasolina estable durante esos 5 años. Por supuesto esta estimación no pretende ser exacta ya que hay otras variables involucradas, pero ilustra perfectamente las implicaciones económicas que conllevaría la implementación de plataformas alternativas.

Tabla 9. Estimación de gasolina liberada del mercado interno

Tipo de Vehículo	Modelo	Consumo de 500.000 vehículos en 5 años [gal]
VCI	Honda Civic	1.252.086.811
VHE	Toyota Prius	755.287.009
	Diferencia	496.799.802

4.8 Evaluación global de plataformas

Para comparar las distintas plataformas tomando en cuenta los indicadores disponibles (técnicos, ambientales y económicos), se propone adaptar a este caso de estudio un procedimiento de normalización (Pistoia 2010). Para cada parámetro considerado debe estimarse un indicador normalizado en el que el valor “1” represente la mejor opción. Se tienen los siguientes parámetros comparativos: eficiencia global, emisiones de CO₂, costo inicial, costo de operación y autonomía. Para la eficiencia y autonomía el indicador se calcula según la ecua-

ción 1, ya que mientras mayor sea la eficiencia global o autonomía, mejor calificado está el vehículo. En los casos restantes el indicador se determina según la ecuación 2, ya que los parámetros de emisiones de CO₂, costo inicial y costo de operación interesan valores mínimos.

$$IndNor_i = \frac{Ind_i}{Ind_{max}} \quad (1)$$

$$IndNor_i = \frac{\left(\frac{1}{Ind}\right)_i}{\left(\frac{1}{Ind}\right)_{max}} \quad (2)$$

Además se propone calcular un indicador general que englobe todos los aspectos considerados, y será tomado como el promedio ponderado de los indicadores previos. En el proceso de ponderación se tomó el mismo peso para todos los indicadores a excepción del indicador de autonomía que se consideró con la mitad de peso. Aunque la autonomía está relacionada con la comodidad del usuario, se consideró, por ejemplo, que el hecho que un VEB tenga menor autonomía no es tan crítico (en comparación con los demás indicadores), si se considera que en promedio estos vehículos pueden recargar sus baterías diariamente mientras estacionan en la casa o en el trabajo. La tabla 10 muestra el indicador generalizado para los distintos casos de estudio.

Tabla 10. Indicador generalizado de plataformas

Sistema de Propulsión	Indicador Generalizado [%]
VEB (Electricidad CC)	81
VHE "Plug-in" (Diesel + Electricidad CC)	77
VHE (Gasolina)	69
VEB (Electricidad Diesel)	69
VHE "Plug-in" (Gasolina + Electricidad CC)	67
VHE "Plug-in" (Diesel + Electricidad Diesel)	67
VHE "Plug-in" (Gasolina + Electricidad Diesel)	65
VCI (Diesel)	54
VCI (Gasolina)	52
VCI (CNG)	46
VCI (Etanol)	41

Como se observa en la tabla 10 el VEB en ambos escenarios de generación se encuentra entre las cuatro mejores opciones. Las plataformas de propulsión híbrida están entre la 2da y la 7ma posición. En las últimas 4 posiciones están las plataformas de combustión interna. Las opciones que sobresalen son el VEB con Electricidad a partir de Plantas CC y el VHE "Plug-in" (Diesel+Electricidad CC). Por un lado la generación CC es más eficiente y menos contaminante que la generación Diesel. Por otro lado, estas dos plataformas tienen un alto porcentaje de autonomía eléctrica respecto a una jornada promedio de 66km. En un segundo grupo vemos

las demás opciones de VHE. Particularmente se puede analizar que aunque el VHE "Plug-in" (Gasolina+Electricidad CC) supera en cuatro de los cinco indicadores al VHE (Gasolina), éste último es apreciablemente más económico (dado a que ha sido fabricado por varios años), por lo que obtiene una puntuación ligeramente superior (aunque también hay que tomar en cuenta que los modelos "Plug-in" considerados son un año más nuevos). Los modelos Diesel toman ventaja frente a los modelos Gasolina en Eficiencia, Costo de operación y Emisiones de CO₂.

También hay que tomar en cuenta que este indicador generalizado no contempla los costos de mantenimiento ni de infraestructura asociados a cada plataforma. Sin embargo, se puede analizar cualitativamente que los costos de mantenimiento le dan cierta ventaja a los VEB y a los VCI frente a los VHE. Y respecto a la inversión en infraestructura, los VEB y los VHE "Plug-in" requerirían un aumento en la capacidad de generación, sin embargo sería un aumento gradual que puede planificarse a la par con el crecimiento del país. Por tanto la inversión en infraestructura no debería ser una desventaja importante de las plataformas VEB y VHE si se compara con las ventajas en ahorro de combustible y eficiencia.

5 Conclusiones

Utilizando los datos anteriores, una comparación técnica, económica y ambiental fue realizada en tres tipos de vehículos: convencional, eléctrico puro e híbrido eléctrico, y a su vez cada uno de éstos alimentados con fuentes de energía distintas. En lo que respecta a los VEB, el impacto ambiental y económico depende de la fuente de energía eléctrica. Se ha observado que si la electricidad es generada a partir de combustibles fósiles, los VEB se mantienen competitivos frente a los VHE. Más aún, si la electricidad es generada a partir de fuentes renovables, el VEB presentará importantes ventajas respecto a las demás plataformas. La tendencia indica que los VEB y los VHE presentan una mejor eficiencia energética. Asimismo reducen las emisiones contaminantes al ambiente. Esto aporta un gran sentido de sustentabilidad a dichas plataformas.

Aunque el costo inicial de los VEB y VHE es superior que el de los VCI, el ahorro de dinero por el menor uso de combustible podría superar el valor de subsidio de esos vehículos por parte del estado venezolano. De igual manera se debe realizar un estudio de factibilidad y rentabilidad considerando medidas tales como el subsidio del reemplazo de las baterías u otros incentivos, para estimular el uso de estos vehículos. Se deja este análisis para estudios posteriores.

En lo que respecta a infraestructura, los VHE presentan una gran ventaja frente a los VEB, ya que los primeros utilizarían la plataforma de distribución de

combustible existente en Venezuela para VCI. Por su parte los VEB dependen de la instalación de puntos de recarga de baterías públicos y residenciales. Además su implementación se traduciría en un incremento en el consumo de electricidad, lo que implica un necesario aumento en las inversiones para elevar la capacidad de generación eléctrica instalada en el país.

Este estudio presenta un primer paso para evaluar la posible aplicación de distintas plataformas de propulsión para el sistema de transporte venezolano, que mejoren su eficiencia y sustentabilidad. Se presenta un análisis comparativo cuantitativo y cualitativo de distintas características de las opciones de transporte particular. Lo presentado en este trabajo da pie para posteriores análisis más detallados que sigan apuntando a recomendar mejoras al sistema de transporte particular, e incluso para iniciar análisis energéticos y de sustentabilidad que comparen distintos tipos de transporte público y/o particular aplicados a Venezuela o a diferentes países en el mundo.

6 Acrónimos y Abreviaturas

CC: Ciclo Combinado
 CNG: Gas Natural Comprimido (“Compressed Natural Gas”)
 EPA: Agencia de Protección Ambiental (“Environmental Protection Agency”) de Estados Unidos
 Gen: Generación (de electricidad)
 GNV: Gas Natural Vehicular
 VCC: Vehículos con Celdas de Combustible
 VCI: Vehículo con MCI
 VEB: Vehículos Eléctricos a Batería
 VHE: Vehículo Híbrido Eléctrico
 MCI: Motor de Combustión Interna

7 Agradecimientos

Reconocemos el apoyo del Decanato de Investigación y Desarrollo y del Laboratorio de Dinámica de Máquinas, ambos de la Universidad Simón Bolívar; además del Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Referencias

- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2016, Síntese dos Preços Praticados – Brasil: Resumo I Período: de 18/09/2012 a 24/09/2012 [en línea] [ref. 22 de septiembre de 2016], Brasil, Disponible en Web <http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Semanal_Combustiveis.asp>.
- Centralamericadata.com, 2016, Precios de combustibles al 12 de septiembre 2016 [en línea] [ref. 22 de septiembre de 2016], EEUU, Disponible en Web <www.centralamericadata.com/es/article/home/Precios_de_combustibles_al_12_de_septiembre_2016>.
- Corporación Eléctrica Nacional, 2016, Procesos Medulares: Generación [en línea] [ref. 22 de septiembre de 2016], Caracas, Disponible en Web <www.corpoelec.gob.ve/generación>.
- COVENIN, 1998, Productos Derivados del Petróleo. Combustibles para Motores Diesel y Gasóleo Industrial, 662:1998, 4a revisión, FONDONORMA, Caracas.
- Ehsani M, Gao Y, Gay S, Emadi A, 2005, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory, and Design, CRC PRESS, Estados Unidos de América, ISBN: 0-8493-3154-4.
- Emadi A, 2005, Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives, CRC PRESS, Boca Raton, ISBN: 0-8247-2361-9.
- Evans R, 2007, Fueling Our Future: An Introduction to Sustainable Energy, Cambridge University Press, New York, ISBN: 0-511-28943-X.
- FAVENPA (Cámara de Fabricantes Venezolanos de Productos Automotores), 2009, Parque Automotor Venezolano 2009: Resumen Ejecutivo. Informe inédito, Venezuela.
- Globalpetrolprices.com, 2016, Precios de la Gasolina, Precios del diesel [en línea] [ref. 22 de septiembre de 2016], EEUU, Disponible en Web <es.globalpetrolprices.com>.
- Husain I, 2005, Electric and Hybrid Vehicles. Design Fundamentals, CRC PRESS, Boca Raton, ISBN: 0-8493-1466-6.
- International Energy Agency, 2011, CO2 Emissions from Fuel Combustion: Highlights [en línea] [ref. 22 de septiembre de 2016], Paris, Disponible en Web <www.iea.org/media/statistics/co2highlights.pdf>.
- Arruz J, 2012, Volvo V60 Plug-in Hybrid [en línea] [ref. 22 de septiembre de 2016], Madrid, Disponible en Web <www.km77.com/00/volvo/v60/plug-in-hybrid/2012/volvo-v60-plug-in-hybrid-precios.asp>.
- Kreith F, West R, 2003, Gauging efficiency: Well-to-wheel, Mechanical Engineering Power, junio 2003, suplemento a Mechanical Engineering Magazine.
- Mytravelcost.com, 2016, Petrol prices around the world [en línea] [ref. 22 de septiembre de 2016], EEUU, Disponible en Web <www.mytravelcost.com/petrol-prices>.
- PDVSA (Petróleos de Venezuela, S.A. y sus Filiales), 2008, Informe Operacional y Financiero al 30 de septiembre de 2008, Caracas.
- PDVSA, 2015, Informe de Gestión Anual 2015, Caracas.
- Pistoia G, 2010, Electric and Hybrid Vehicle: Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market, Elsevier, Amsterdam, ISBN: 978-0-444-53565-8. (doi: 10.1016/B978-0-444-53565-8.00023-3).
- Ramones M, 2016, Parque automotor de Venezuela ha envejecido un 50% [en línea] [ref. 09 de mayo de 2016], Venezuela, Disponible en Web

<www.panorama.com.ve/ciudad/Parque-automotor-de-Venezuela-ha-envejecido-un-50-20160509-0080.html>.
Ravelo O, Sepúlveda M, 2009, Energía Eólica en Venezuela, En: V Seminario de Ecoeficiencia, Producción Limpia y Consumo Sustentable, Universidad Metropolitana, Caracas, Disponible en Web <www.vitalis.net/VSeminarioEcoeficiencia.htm>.
Romero-Quintini JC, 2009, Diseño e implementación de un sistema de control de flujo de energía en el tren de potencia de un Vehículo Híbrido, Tesis de Maestría, Universidad Simón Bolívar, Caracas.
Tradingeconomics, 2016, Ethanol [en línea] [ref. 22 de septiembre de 2016], EEUU, Disponible en Web <www.tradingeconomics.com/commodity/ethanol>.
U.S. Department of Energy, 2011, Fuel Economy Guide: Model Year 2011 [en línea] [ref. 22 de septiembre de 2016], EEUU, Disponible en Web <www.fueleconomy.gov/feg/feg2011.pdf>.
U.S. Department of Energy, 2015, Fuel Economy Guide: Model Year 2015 [en línea] [ref. 22 de septiembre de 2016], EEUU, Disponible en Web <www.fueleconomy.gov/feg/pdfs/guides/FEG2015.pdf>.
U.S. Department of Energy, 2016, www.fueleconomy.gov: the official U.S. government source for fuel economy information [en línea] [ref. 22 de septiembre de 2016]. Disponible en Web <www.fueleconomy.gov>.
Unidad de Planeación Minero Energética, 2016, Sistema de Información de Petróleo y Gas Colombiano: Indicadores [en línea] [ref. 22 de septiembre de 2016], Colombia, Disponible en Web <www.upme.gov.co/GeneradorConsultas/Consulta_Indicador.aspx?idModulo=3&Ind=8>.
Wikipedia, 2016, Central termoeléctrica [en línea] [ref. 22 de septiembre de 2016], EEUU, Disponible en Web <es.wikipedia.org/wiki/Central_termoeléctrica>.

Romero Quintini, Juan Carlos: *Magíster en Ingeniería Mecánica y profesor del Departamento de Mecánica de la Universidad Simón Bolívar*

Contreras Cordero, Francisco José: *Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad Simón Bolívar. Correo electrónico: contreras.francisco@outlook.com*

Maan Di Camppli, Freddy José: *Estudiante de Ingeniería Mecánica de la Universidad Simón Bolívar. Correo electrónico: 12-11457@usb.ve*

Guzmán Arguis, Victor Manuel: *Ph.D en Ingeniería Electrónica y profesor del Departamento de Electrónica y Circuitos de la Universidad Simón Bolívar. Correo electrónico: vguzman@usb.ve.*

Capítulo 40

Un modelo de optimización de rutas de ventas para la distribución de productos

Yépez, Sara^{1*}; Márquez, Renny²; Calderón, Ana

¹Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería.

²Escuela de Ingeniería de Sistemas. Facultad de Ingeniería.
Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

[*sarayepetzv@ula.ve](mailto:sarayepetzv@ula.ve)

Resumen

Este trabajo presenta un modelo de optimización para las rutas de ventas del proceso de distribución de productos de la Distribuidora El Campesino C.A (localizada en Santa Elena de Arenales, Municipio Obispo Ramos de Lora, Estado Mérida), utilizando el algoritmo de “El Vecino más Cercano” para asignar en una primera etapa, los clientes que pertenecen a cada sub-ruta diaria de distribución y el método del “Problema del Agente Viajero” en una segunda fase, en conjunto con “El Problema del Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo”, para determinar el recorrido con el cual es posible la minimización de los tiempos totales de atención diaria a clientes. Se estudió el proceso a través de la observación directa de la ruta de mayor repercusión económica de la empresa y de la información disponible de rutas, clientes, distancias y tiempos de recorrido y con ello, se construyó un modelo que fue probado y validado con datos reales. Los resultados de los escenarios evaluados mostraron un alto potencial de réplica para diferentes rutas y con limitantes variables de cliente a cliente. Estos resultados podrían servir de base para la mejora del desempeño de los representantes de ventas de la distribuidora.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

Las empresas dedicadas a la distribución de productos dentro de lo que constituye la cadena de suministros, se someten frecuentemente a procesos de incertidumbre que exigen “gestiones flexibles” para dar respuestas adecuadas y oportunas (Sanchis y col., 2009). El estudio de la distribución física de productos de cualquier empresa de distribución, persigue, tal como lo aseguran Ferrer, Coves y De Los Santos (2004), optimizar la asignación de la entrega de productos desde los centros de acopio hasta los clientes finales, con los recursos disponibles (vehículos). Así, la parte vital de éste tipo de empresas, la constituye el equipo de ventas, que debe contar con una estructuración de rutas de ventas a clientes distintos, que le permita generar la máxima entrega, al mínimo costo posible y cumpliendo siempre con las normativas laborales vigentes. A partir de ello, se muestra en el presente artículo, el desarrollo de un modelo de asignación de sub-rutas diarias que reproduce el proceso de ventas que realizan los representantes de ventas de la Distribuidora El Campesino C.A., al igual que el diseño de un mapa de rutas basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG), para la visualización rápida de las mismas y la proyección de nuevas rutas. Se busca en el estudio, evaluar diferentes métodos heurísticos, tal como lo plantean Cadillo (2011) y Olivera (2004) utilizados en la optimización de rutas de ventas de la distribución de productos (Sanguino 2001) para mejorar la situación de la empresa objeto de estudio. De ese modo, constituyendo la base conceptual de la investigación, se destaca el planteamiento de Gómez y col., (2015) para estrategias de ruteo en una red de distribución de cárnicos donde se utiliza el Algoritmo TSP (TravelSalesmanProblem – Problema del Agente Viajero) y la Teoría de Grafos, al igual que el trabajo de Puchades y col., (2008), con respecto a éste último método citado, para mejorar junto con la ingeniería organizacional, la planificación de rutas de trabajo de una empresa manufacturera. Por su parte, Ferrer et al. (2006) proponen la aplicación del DistanceConstrained-VehicleRoutingProblem (Problema de Ruteo de Vehículos con Distancia Restringida-DVRP) para asegurar la visita a clientes de una ruta con restricciones de tiempo de atención. Teniendo en cuenta las referencias anteriores y el Modelo Real del ruteo de ventas de la empresa objeto de estudio, se plantea el Modelo matemático, contemplando parámetros y restricciones del proceso. Se discuten posteriormente, los resultados del modelado y se plantean escenarios de prueba del modelo y de trabajo, que permiten finalmente el establecimiento de las conclusiones de la investigación y posibilidades de investigaciones futuras.

2 Modelo Real: Ruteo de Ventas de la distribuidora.

La Distribuidora El Campesino C.A comercializa y distribuye alimentos de consumo masivo y productos para el hogar, en gran parte del occidente de Venezuela. Es una empresa que cuenta con un galpón que alberga 4800 Tonm

de productos, una flota de transporte para despacho de 20 vehículos con capacidades de 5 Ton y 3 Ton, y un sistema administrativo para transmisión de información y recepción de pedidos, procesamiento de compras a proveedores, ventas, control de inventario y manejo de nómina. El sistema de atención a los clientes está definido en tres (3) modalidades:

- Modalidad 1: Clientes atendidos por rutas, formada por 20 representantes de ventas, distribuidos en diferentes zonas.
- Modalidad 2: Clientes atendidos por oficina, constituida por 7 puntos de ventas. Disponible para clientes finales de zonas fuera del alcance de representantes de ventas.

- Modalidad 3: Servicio de compras en línea, a través de la página web de la empresa.

Así, la empresa tiene tipificados a los clientes según su capacidad de ventas (tabla No. 1), y los mismos son abordados en la venta de rutas como se detalla (Ver Fig 1): Cada vendedor de ruta se dirige diariamente desde su residencia hasta la zona a cubrir, según la planificación de los itinerarios, recibiendo los reportes físicos de cobranzas en un punto de referencia cercano, para no tener que dirigirse hasta el centro de distribución, teniendo en cuenta que dicho centro queda en ocasiones retirado hasta 150 km de éste.

Tabla. No. 1. Tipos de Clientes. Fuente: Propia.

TIPO DE CLIENTES	
Abastos	Hoteles, restaurantes, cafés
Agropecuarias	Kioscos
Auto-accesorios	Licorerías
Autolavados	Mayoristas
Bazares y Quincallas	Panaderías
Bodegas	Papelerías
Chacutería, carnicería y lacteos	Perfumerías
Cooperativas	Puestos de Mercados
Confiterías	Sub-Distribuidores
Estación de Servicios	Supermercados Independientes
Farmacias	Tiendas de Conveniencia

B. Una vez que llega al primer cliente, el vendedor realiza el cobro de facturas del pedido anterior.

C. El vendedor procede a tomar un nuevo pedido, en el sistema administrativo para pocket (teléfono para envío de información), que tiene la información de productos disponibles.

D. El vendedor envía el pedido vía telefónica al Centro de Distribución. En ocasiones éste, toma varios pedidos y hace el envío de la data en tiempos posteriores.

E. El Centro de Distribución confirma el pedido o los productos disponibles en las presentaciones y cantidades solicitadas, y el vendedor le avisa al cliente para posterior facturación. En caso de que haya devoluciones, se espera por los choferes de camiones.

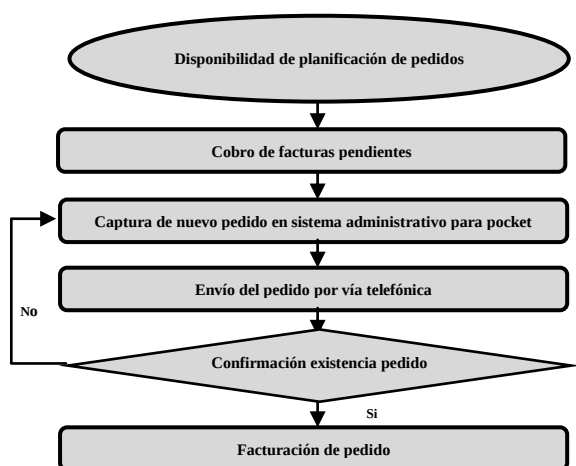


Figura 1. Proceso de ventas de Distrib. El Campesino C.A. Fuente: Propia.

Las rutas de los representantes de ventas no pueden conformarse con más de 20 clientes (política de la empresa) y están estructuradas tal como se muestra en la tabla No. 2, teniendo en cuenta que hay dos grandes tipos de rutas:

- las generales, porque cubren diferentes tipos de clientes y se comercializan diferentes tipos de productos, y
- las focalizadas, que implican clientes tipo canal medio (supermercados, mayoristas y abastos) donde algunos manejan marcas específicas.

Cada ruta contiene una cantidad de clientes, que son visitados a diferentes frecuencias según sus requerimientos:

- Frecuencia 1: Clientes visitados una vez al mes.
- Frecuencia 2: Clientes visitados cada 15 días (c/2 semanas).
- Frecuencia 3: Clientes de visita variada según solicitud.
- Frecuencia 4: Clientes visitados una vez por semana.

El tiempo de visita y la frecuencia de cada cliente dependen principalmente de su tipo. De modo que, a menor frecuencia de visita, el tiempo de servicio es mayor pues se acumula mayor cantidad de pedido.

Tabla 2: Rutas de la Distribuidora El Campesino C.A. Fuente: Administración Distribuidora El Campesino C.A.

Rutas-Zonas	No. Clientes
R01 Clientes de Oficina – Zonas diversas	3659
R02 El Chivo – 4 esquinas – Mozioco – La Fortuna	97
R03 Coloncito – La Tendida	68
R04 Tucaní – El Pinar – Capazon	99
R05 Morallito - Caracolí - ElVigia - Mucujepe - Guayabones	81
R06Caja Seca – Nueva Bolivia	82
R07Sta. Barbara – San Carlos del Zulia	100
R08 Ejido – Lagunillas	85
R09Valera-Trujillo-Sabana de Mendoza-Arapuey-Buena Vista	51
R10 Encontrados – El Guayabo – Sta. Cruz del Zulia	100
R11Sta. Elena de Arenales – La Azulita	100
R12 Cuentas Claves – Zonas Diversas	54
R13 Mesa Bolívar – Sta. Cruz de Mora – Tovar	98
R14 Canal Medio Foco – Ejido-Mérida	31
R15 Canal Medio Foco –Zonas Diversas	30
R16 El Vigia	33
R17 Páramo	46
R18 Mérida – Centro	63
R19 Los Próceres	54
R20 Caño Seco – La Blanca	98

La gestión de ventas puerta a puerta, plantea el manejo

de tiempos de ventas para cumplir la planificación, que incluye el tiempo de traslado entre clientes y el tiempo de servicio, incluyendo situaciones imprevistas como accidentes de tránsito, esperas no estimadas y otras, que afectan el proceso de ventas y demanda de mejoras y ajustes para ser efectivos.

3 Modelo Matemático del proceso de ventas por rutas

A partir de que la empresa contempla varias rutas de ventas con cantidades de clientes diferentes, se selecciona para el estudio la ruta de mayor impacto económico, que corresponde a la Ruta R14 (Mérida-Ejido) que además esta, conformada por clientes focalizados y de canal medio - Mayoristas y Supermercados Independientes- que amerita tiempos elevados de atención (hasta 1 hora con 30 minutos) y con una frecuencia de visita tipo 4. La ruta además contempla una zona, bastante congestionada, debido al alto tráfico, que obliga a realizar traslados entre clientes a bajas velocidades, lo que limita la disponibilidad de tiempo. En función de las características propias del proceso de ventas puerta a puerta, se utilizan métodos de programación lineal que implican como variable de análisis a la “distancia”, teniendo presente que la variable “tiempo” es susceptible a factores externos diversos que no pueden ser controlados por el analista ni por la organización de la empresa.

Por su parte, debe resaltarse que la variable “costos”, que inicialmente se visualiza para el análisis, se descarta por no tener acceso a información relacionada. A partir de la variable de referencia y tomando en cuenta las características de las rutas se plantea el modelado en dos etapas: “Asignar Primero y Rutear después”, por cuanto simplifica el proceso de iteración de la selección de las distancias más cortas entre un grupo considerable de elementos, y por ende del tiempo de análisis, es decir, permite hacer la selección de las rutas partiendo del arreglo macro a la subruta o micro-arreglo de clientes con mínimo recorrido (Ver Fig 2). De esta forma se tiene:

Fase 1: Determinación de sub-rutas diarias de la ruta de ventas. En esta fase se utiliza el Método “El Vecino más Cercano”, cuya heurística de iteración contempla un modelo sencillito con un tiempo de ejecución breve (0,3 segundos), sin obviar que el porcentaje de desviación del óptimo es del 18,6 % (Martí 2003), para determinar la cantidad de clientes que conforman las sub-rutas diarias de distribución. Así, se definen criterios de construcción de las sub-rutas:

1.1. Se determina el número promedio de clientes que constituirá a cada sub-ruta (n), utilizando la ecuación No. 1:

$$n = \text{Aprox entero sup} \left(\frac{\text{No. Clientes de la Ruta}}{\text{No. Periodos de Cobertura}} \right) (1)$$

donde,

No. Clientes de la Ruta: Número de clientes que conforman la ruta total.

No. de Periodos de Cobertura: Número de días disponibles para cubrir la ruta en su totalidad.

Se destaca entonces, que la cantidad de clientes que conforman las sub-rutas no son constantes para cada periodo de cobertura, tomando en cuenta el tiempo de servicio de

acuerdo a los tipos de clientes (Supermercados, Abastos, Bodegas, entre otros), al igual que el tiempo de traslado entre un cliente y otro, el cual varía según la distancia entre los clientes.

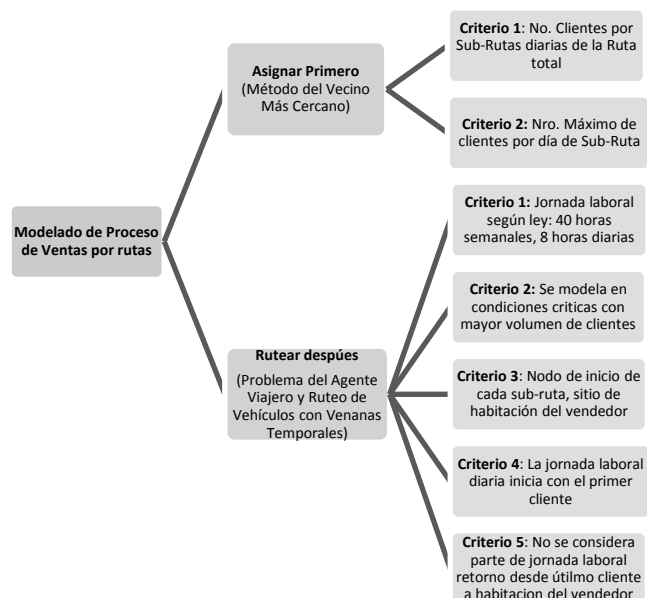


Fig 2. Etapas y Criterios del Modelado de Distribución. Fuente: Propia.

1.2. La empresa establece como política de ventas, que, a lo sumo, cada vendedor debe atender un número máximo de 20 clientes por día. En este sentido, se considera para el análisis, un máximo de 20 nodos (clientes) para sub-rutas diarias, incluyendo como primer nodo, el punto de inicio común del vendedor para cada día, el cual se selecciona de acuerdo a las condiciones de conveniencia del vendedor - menor distancia con su lugar de habitación, preferencia de horario-, y desestimando para ello, aquellos clientes que se localizan en los puntos más extremos y distantes de la ruta analizada.

Fase 2: Optimización de las Sub-Rutas. A partir del patrón de ventas antes obtenido, se utiliza el modelo matemático del “Problema del Agente Viajero”, por cuanto resulta bastante eficiente y acertado en modelado de rutas en lo que corresponde a la orientación del recorrido de un cliente a otro. Sin embargo, debido a que cada cliente, delimita horarios de atención específicos, se utiliza adicionalmente el modelo del “Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo”. Se consideran en esta fase de modelado, los criterios de análisis de mayor conveniencia por cercanía y tipo de cliente:

2.1. De acuerdo a la Ley Orgánica del Trabajo (LOTTT), los Trabajadores, tienen una jornada laboral (Art. 173) de 40 horas a la semana, y la empresa ha fijado un horario de trabajo de cinco días de la semana (lunes a viernes) y 8 horas diarias en un horario, de 7:00 a.m. a 12:00 p.m. y luego de 1:00 p.m. a 4:00 p.m., teniendo una hora de descanso entre ambos turnos. Para algunos clientes, la hora de descanso

es utilizada para atención de proveedores, por lo que el vendedor ajusta la jornada.

Debido a que la frecuencia de visita de algunos clientes varía (mensual, quincenal y semanal), podría pensarse en una ruta para cada caso. Sin embargo, partiendo de que en una de las semanas del mes coinciden las diferentes frecuencias de visita, se plantea para el modelado particular de las rutas de ventas, la situación más crítica donde el volumen de clientes es elevado (coincidencia de fijos semanales, fijos quincenales y fijos mensuales).

Teniendo en cuenta, que el origen de partida diaria para cada subruta de venta, corresponde al sitio de habitación de cada vendedor, se constituye éste en un punto fijo de localización, correspondiendo al nodo de inicio.

Se estima que el tiempo de la jornada diaria comienza a contar desde el momento en que el vendedor llega al primer cliente, es decir que el tiempo de traslado entre el nodo inicial o punto de partida y el primer cliente, no se contempla como tiempo para la jornada de trabajo.

De igual forma, el tiempo de regreso del vendedor a su residencia o punto de localización inicial, tampoco se considera dentro de las horas laborables.

3.1. Variables del Modelo

Señalados los criterios de análisis de construcción del modelo, se establece a X_{ij} como la variable del modelo, correspondiente al traslado o recorrido que hace el vendedor entre el cliente i y el cliente j , con un comportamiento binario, con valores únicos de 0 y 1. Esto, de modo que cuando la variable asume el valor de 1, se entiende que el vendedor ha realizado el recorrido entre el cliente i y el cliente j , y que cuando su valor es 0, no se ha realizado ningún traslado. Así, se determina que el número de variables del modelo depende del número de clientes que constituyan cada ruta. En el caso de estudio particular de la ruta seleccionada (R14), el número de clientes corresponde a 31, definiendo ello que la ruta se comprende de 32 nodos, asumiendo como el primero al punto de localización inicial del vendedor más los 31 clientes a visitar.

Teniendo presente que se persigue con el modelo, minimizar las distancias, donde no necesariamente el recorrido de ida de un cliente a otro es el mismo de retorno, aunque en ocasiones se cumple, y que las direcciones y sentidos de calles y avenidas no son iguales, se delimitan distancias menores que deben contemplarse con la estimación de recorridos inversos para aproximar el objetivo. De esta forma, se establece que el total de variables del modelo para el caso (R14), es de 1024 (32×32) y que la representación de las mismas queda formulada (2) de la siguiente forma:

$$X_{ij}, \text{ con } i = 0, 1, \dots, 31 \text{ y } j = 0, 1, \dots, 31 \quad (2)$$

donde,

el primer nodo (punto de salida del vendedor) tiene valor “0”.

Ahora bien, una vez que se delimita el patrón de análisis y que se determina el número máximo de clientes de conformación de cada sub-ruta, la cantidad de variables se reduce, puesto que en ese caso se considera solo el número

de clientes que pertenecen a la sub-ruta a optimizar, quedando el número de variables determinado de la manera siguiente (ecuación No. 3):

$$\text{No. de Variables por subruta} = (n + 1) \times (n + 1) \quad (3)$$

donde retomando,

n= Número de clientes diarios por sub-ruta.

3.2. Parámetros del modelo

Tal como se enuncio anteriormente, los parámetros del modelo corresponden a las distancias entre nodos(Dij) y el tiempo de traslado entre un cliente y otro (Tij), al igual que el tiempo de servicio o atención al cliente denotado como Sj. Así, teniendo en cuenta que la distancia es el parámetro principal del método para la construcción del modelo de optimización, resultan necesarias las capturas de distancias entre los clientes que conforman dicha la ruta. Para ello, se utiliza la herramienta Google Maps, que permite la determinación de tales distancias, identificando previamente la ubicación de los clientes de la ruta en cada zona correspondiente, tomando en cuenta la dirección de las calles y avenidas por las cuales circula el vendedor durante la cobertura de cada una de ellas. En la Fig 3, se muestra un ejemplo de cómo se captura la distancia entre un cliente y otro, y en la tabla No. 3, se muestra un extracto de las distancias extraídas entre nodos o clientes, con la herramienta. Disponiendo de las distancias, se determinan los tiempos de traslado entre un cliente y otro, relacionando la distancia existente entre ellos y la velocidad habitual a la que transitan los vehículos en zona (información extraída de Google Maps).



Fig 3. Captura de distancia entre clientes, usando Google Maps. Fuente: Google Maps

Tabla No. 3. Extracto de distancias entre clientes o nodos de ubicación (m). Fuente: Google Maps.

	0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
0	0	9900	9700	9711	9100	9000	8200	8100	8113	8130	8247	8300	7700	8000	7200	7800
C1	10100	0	1700	1711	2276	2904	3310	3202	3215	3233	3349	3341	2680	3900	3350	4040
C2	11000	2150	0	11	576	1270	1460	1300	1313	1330	1447	1400	1500	2000	2100	2300
C3	11011	2139	11	0	564	1259	1449	1289	1302	1319	1436	1369	1489	1989	2089	2289
C4	8600	2690	1040	1029	0	628	839	700	713	731	847	835	986	1390	1500	1530
C5	9300	3050	1601	1590	1070	0	1160	1180	1167	1150	1033	1520	1680	2060	2200	2000
C6	8100	3240	1260	1249	1390	1270	0	408	421	439	555	357	513	919	1100	1050
C7	8900	3740	1871	1860	1350	848	519	0	13	30	147	52	1060	1240	1400	1000
C8	8887	3727	1858	1847	1337	835	506	13	0	17	134	65	1047	1227	1387	987
C9	8870	3710	1841	1830	1320	818	488	30	17	0	117	82	1029	1210	1370	970
C10	8753	3569	1724	1713	1203	701	372	147	133	117	0	198	889	1093	1253	853
C11	8200	3233	1330	1319	1030	900	199	52	65	82	198	0	553	1300	1100	1058
C12	10600	2680	2150	2161	1870	1370	1041	522	536	553	669	661	0	1220	670	1360
C13	7800	4800	4300	4311	1900	1782	1082	934	947	965	1081	885	2100	0	2098	456
C14	7600	3200	3900	3911	2200	2100	1400	1300	1313	1330	1147	1500	900	2540	0	2460
C15	8000	4500	4500	2711	1829	1698	997	850	863	880	997	198	1351	242	2340	0

Se realiza entonces, un pequeño muestreo de tiempos y distancias de traslado entre varios puntos, dentro de una misma zona, y para validar tales datos se utiliza la ecuación No. 4:

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{Distancia}}{\text{tiempo}} \quad (4)$$

En virtud de que hay nodos cuya distancia entre ellos, es menor a 300 metros, se decide tomar como tiempo de traslado entre tales puntos, el dado directamente por la aplicación Google Maps opción “a pie”, pues se tiene conocimiento de que en distancias próximas, los vendedores tienden a trasladarse a pie y no en automóvil.

Así, se verifica en la tabla No. 4 las muestras de velocidades promedio capturadas para las zonas (Centro-Mérida y Ejido-Mérida), correspondientes a la ruta seleccionada (Ruta 14). De igual manera, tomando en cuenta los criterios 2.4 y 2.5, de la fase 2, se tienen que los valores de los tiempos de traslados entre los nodos, lugar de habitación y primer cliente o primer nodo y último cliente y lugar de habitación tienen valor cero (0). A partir de lo indicado, se calculan los tiempos promedios de traslado entre un cliente y otro, de los cuales se muestra un extracto en la tabla que sigue (No. 5).

Otro de los parámetros que condicionan, la construcción de las rutas, son los tiempos de servicio o de atención a los clientes, y para ello, se toman los tiempos de atención al cliente recolectados en visitas que se hacen junto a los representantes de ventas entre los meses abril y mayo del año 2016, para el establecimiento de los tiempos promedios de servicio según los tipos de clientes (Tabla No. 6).

Tabla 4. Velocidad promedio por zona. Fuente: Google Maps.

Mérida-Centro					Mérida-Ejido				
Distancia (m)	Tiempo (min)	Velocidad (m/min)	Distancia (m)	Tiempo (min)	Velocidad (m/min)	Distancia (m)	Tiempo (min)	Velocidad (m/min)	Distancia (m)
500	2	250,00	1900	5	380,00				
1100	4	275,00	700	2	350,00				
1500	6	250,00	550	1	550,00				
1700	6	283,33	1700	4	425,00				
1500	5	300,00	1900	4	475,00				
4200	8	525,00	1200	3	400,00				
3700	8	462,50	700	1	700,00				
4000	9	444,44	800	2	400,00				
4000	9	444,44	750	2	375,00				
3300	7	471,43	700	1	700,00				
4300	9	477,78	850	2	425,00				
750	2	375,00	1300	3	433,33				
1000	3	333,33	1100	4	275,00				
1100	4	275,00	500	1	500,00				
1600	5	320,00	800	2	400,00				
Velocidad Promedio (m/min)		366,82	Velocidad Promedio (m/min)		462,66				

Tabla 5. Extracto de Tiempos de traslados entre clientes (min). Fuente: Google Maps.

	0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
0	0	0	27,1	26,5	26,5	25,3	24,6	22,2	22,2	23,1	22,9	23,1	21,0	21,9	19,7	22,6
T1	27,6	0	0	4,6	4,7	6,2	79,0	8,5	8,8	8,9	8,9	9,0	9,1	7,5	10,5	9,2
T2	31,2	5,9	0	0	2,1	1,6	3,5	4,1	3,6	3,6	3,6	4,1	3,6	4,1	5,5	5,8
T3	30,2	5,8	0,2	0	1,5	3,4	4,1	3,5	3,5	3,6	3,9	3,9	4,1	5,4	5,7	6,3
T4	24,5	7,3	2,8	2,8	0	1,7	2,3	1,9	1,9	2,0	2,3	2,3	2,5	2,7	4,0	4,8
T5	22,4	8,5	4,3	4,3	2,9	0	3,2	3,2	3,2	2,8	4,1	4,3	5,6	5,9	5,4	
T6	22,1	8,9	3,4	3,4	3,8	3,3	0	0,1	1,2	1,2	1,5	1,0	1,4	2,3	3,0	2,9
T7	25,3	10,2	5,0	5,0	3,7	2,5	1,4	0	0,2	0,3	2,1	0,8	1,4	2,5	3,6	2,7
T8	26,3	10,9	5,1	5,0	3,7	2,3	1,4	0,2	0	0,3	2,1	0,8	1,4	2,5	3,6	2,7
T9	24,2	10,5	5,0	5,1	3,7	2,3	1,4	0,4	0,3	0	1,7	1,2	2,7	2,9	3,4	2,7
T10	24,3	9,7	4,7	4,8	3,3	1,9	1,0	2,1	2,0	1,7	0	2,9	2,4	3,0	3,4	2,3
T11	22,4	8,8	3,5	3,6	2,8	2,3	2,9	0,8	1,0	1,2	2,7	0	1,5	3,5	3,0	2,9
T12	29,5	7,3	5,9	5,9	5,0	3,7	2,9	1,4	1,6	1,5	1,7	1,8	0	3,3	1,8	3,9
T13	21,6	12,9	11,8	11,6	5,1	4,5	3,0	2,5	2,6	2,5	3,0	2,4	5,5	0	5,7	1,2
T14	20,8	8,7	10,7	10,7	5,8	5,5	3,8	3,6	3,6	3,5	4,0	3,5	2,5	6,9	0	6,5
T15	23,2	12,5	7,5	7,5	5,0	4,6	2,8	2,3	2,4	2,4	2,7	2,9	3,6	3,6	6,4	0,0

Tabla 6. Tiempos promedio de servicio por tipo de cliente. Fuente: Propia.

TIPO DE CLIENTES	Tiempos promedios de servicio (Hr:Min:Seg)
Abastos	00:55:40
Agropecuarias	00:26:56
Bazares y Quincallas	00:18:10
Bodegas	00:42:24
Charcutería, carnicería y lácteos	00:29:37
Confiterías	00:17:44
Farmacias	00:38:32
Ferreterías	00:12:25
Genéricos	00:08:29
Hoteles y Restaurantes	00:32:25
Mayoristas	00:40:12
Panaderías	00:15:34
Perfumerías	00:28:20
Puestos de Mercado	00:20:15
Sub-Distribuidores	00:13:45
Supermercados Independientes	01:12:56
Tiendas de conveniencia	00:16:31

Es partir, de los registros de tiempos de cada tipo de cliente, que se determina el tiempo promedio de servicio según su tipo, para los clientes de la ruta evaluada (Tabla No. 7).

Tabla No. 7. Tiempos Promedios de Servicios para clientes ruta R14. Fuente: Propia.

Cliente	Tipo de Cliente	Tpo. de Servicio
C1, C2, C4, C5, C10, C12, C14, C15, C17, C18, C20, C22, C24, C25, C26, C27, C28, C29	Supermercados Independiente	01:12:56
C3, C19	Abastos	00:55:40
C6, C9, C11	Perfumerías	00:28:20
C7	Bazares y Quincallas	00:18:10
C8	Confiterías	00:17:44
C16, C21, C23, C30, C31	Mayoristas	00:40:12

Finalmente, se consideran las preferencias de horario de atención de proveedores que tienen los clientes, los cuales deben ser acatados para asegurar las ventas estimadas. Así, todo horario de atención delimita un intervalo de tiempo, cuyos límites para efectos del modelo en construcción se denominan ai y bi , donde ai corresponde al tiempo de llegada del vendedor a la localización de un cliente y la ejecución de la visita; y bi , por su parte representa el tiempo tope de la cual dispone el vendedor desde que sale de la localización del cliente hasta que llega a la localización del siguiente cliente. Se establece además, la hora cero (0) como las 7:00 am, cuando llega el vendedor a visitar al primer cliente y los minutos de atención y los siguientes se suman a partir de esta hora (30 min de atención del primer cliente, se registran como 7:30 am, 60 min corresponden a 8:00 am y así sucesivamente para indicar las horas posteriores). En la tabla No. 8, se muestran los horarios establecidos por cada uno de los clientes de la ruta 14, para atención de proveedores.

Tabla No. 8. Horarios de atención de proveedores por tipo de cliente (min). Fuente: Propia.

i	0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
ai	0	30	0	30	30	60	30	30	60	30	60	30	60	30	30	0
bi	480	300	480	300	360	360	420	480	420	420	360	480	300	360	420	360
i	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29	C30	C31
ai	60	60	30	60	60	60	60	30	0	60	30	30	60	60	60	30
bi	480	420	480	420	480	480	300	480	480	420	480	420	480	480	420	420

3.3. Función Objetivo

El objetivo que persigue el modelo, contempla la minimización de la distancia total a ser recorrida por un vendedor para cubrir a todos los clientes asignados en cada subruta diaria, que corresponde a la división de la ruta global de cada vendedor entre el número de días disponibles para cubrirla por completo. Por tanto, la Función Objetivo

del modelo de programación lineal para el problema de ruteo de ventas planteado, corresponde a la ecuación No. 5, que sigue a continuación:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n D_{ij} X_{ij} \quad (5)$$

donde,

- D_{ij} : Distancia existente entre el cliente i y el cliente j .
- X_{ij} : Arco que indica si el vendedor se traslada o no entre el cliente i y el cliente j .
- n : Número de clientes de una sub-ruta (Ec. No.1).

3.4. Restricciones del modelo

Destacando, las situaciones condicionantes que debe acatar la distribuidora para llevar a cabo el ruteo de ventas de productos, se definen las siguientes restricciones funcionales para el modelo en construcción:

1. La empresa establece como política de ventas que, todo vendedor hace solo una visita efectiva por cliente en el día programado de acuerdo a la sub-ruta. De manera que el vendedor hace el viaje, toma de forma efectiva el pedido y/o realiza la cobranza, y al salir no requiere volver a visitar a ese cliente, ni en el día ni en la semana (Condición general del Problema del Agente Viajero). Así, se estima que en un día se visite un cliente solo una vez (en el caso analizado se tiene para cada subruta diaria un total de 16 restricciones), y las restricciones se definan por las ecuaciones No. 6 y 7:

$$\sum_{i=0}^n X_{ij} = 1 \quad \forall j = 0, 1, \dots, n \quad (6)$$

$$\sum_{j=0}^n X_{ij} = 1 \quad \forall i = 0, 1, \dots, n \quad (7)$$

2. Partiendo de lo establecido en el criterio No.2.1 de la jornada diaria de trabajo, se define la ecuación No. 8:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (T_{ij} + S_j) X_{ij} \leq 480 \quad (8)$$

y adicionalmente, como se debe garantizar que los clientes sean visitados en los horarios de atención establecidos para los vendedores o en sus ventanas de tiempo, se define el intervalo (bajo la figura de ecuación No.9) a continuación:

$$ai \leq Pi \leq bi \quad \forall i = 0, 1, \dots, n \quad (9)$$

donde,

P_i es el tiempo en que inicia el vendedor la visita al cliente i .

Así, no se puede obviar que se debe garantizar que el tiempo de inicio de visita del cliente j sea mayor o igual al tiempo de inicio de atención al cliente i más el tiempo en que demora el vendedor atendiendo a este cliente y el tiempo de traslado hasta el cliente j . Para ello, se dispone la ecuación No. 10:

$$(P_i + S_i + T_{ij} - P_j) \leq (1 - X_{ij}) \times MT \quad (10)$$

donde,

MT es un valor muy grande, determinado por la ecuación No. 11:

$$MT = \max(b_i + S_i) + \max(T_{ij}) \quad (11)$$

3. Como condicionante propia de todo modelo de programación lineal, se establecen las restricciones de no negatividad, donde la variable X_{ij} debe ser mayor o igual que cero (0), resaltándose que dicha variable toma a lo

sumo el valor de “1”. Se tiene entonces que (ecuación No. 12):

$$X_{ij} \geq 0 \forall i = 0, 1, \dots, n \text{ y } j = 0, 1, \dots, n \quad (12)$$

4 Implementación Computacional del Modelo Matemático

Para el estudio, se emplea la herramienta computacional Dev-C++ de entorno de desarrollo integrado (Integrated Development Environment-IDE) para C y C++, en la implementación del modelo construido, porque su estructura y lenguaje de programación es sencilla y porque genera rápidamente a quien visitar. Para la codificación del algoritmo se considera lo contemplado en la fase 1 del modelado, como son el número de clientes que conforman la ruta y el número de periodos disponibles para atender al total de clientes. Así, se calcula el número de clientes de cada sub-ruta. Posteriormente, se registran las variables (traslado entre clientes definidos) y los parámetros de la función que permite obtener los clientes que conforman cada una de las subrutas. En la Fig 4, se dispone el archivo .exe, que muestra el nro. máximo de clientes para R14, durante los cinco días de la semana, de los 7 clientes diarios en promedio así como los clientes asignados a la sub-ruta diaria, la posición del cliente i y j , al igual que la distancia entre los mismos.

Ahora bien, luego de obtenidos los clientes de cada sub-ruta, se procede a determinar el recorrido mínimo posible de visita a los clientes, tomando siempre en consideración cada uno de los criterios y restricciones del proceso de ventas (fase 2). Siendo el Problema del Agente Viajero, un modelo matemático de programación lineal, se emplea para esta fase el paquete de software GLPK (Makhorn, 2000), consistente en una serie de rutinas escritas en ANSI C, junto con la herramienta GUSEK que provee una interfaz gráfica y el editor de texto Scite.

```

El numero de Clientes por día sera: 7

Las Sub-rutas son:
Dist i j
1100 0 30
446 30 31
2600 31 20
2000 20 23
1500 23 25
527 25 22
1600 22 24

Dist i j
6500 0 20
713 20 27
1000 27 29
1330 29 26
1200 26 17
403 17 16
33 16 18

Dist i j
8700 0 21
2000 21 14
900 14 12
522 12 7
15 7 6
17 6 9
69 9 15

Dist i j
6500 0 19
986 19 13
802 13 11
190 11 10
371 10 6
1249 6 3
11 3 2

Dist i j
9000 0 4
1070 4 5
2690 5 1

```

Fig 4. Resultados de la primera fase. Fuente: Consola DevC++.

Para la implementación del modelo matemático se introducen los datos: número de clientes para cada sub-ruta

(n), los parámetros de tiempo máximo disponible para la atención de los clientes, distancia y tiempo de traslado entre los mismos, tiempo de servicio de acuerdo a tipos de los clientes y los horarios de atención preestablecidos por cada cliente. En las tablas No. 9-12, se muestran los datos tabulados de los clientes asignados en la fase anterior para el primer día de la semana (C30, C31, C20, C23, C25, C22, C24), y así para los siguientes días.

Tabla No. 9. Distancia entre clientes (m). Fuente: Foogle Maps. Tabla No. 10. Tiempo de traslado entre clientes (m). Fuente: Foogle Maps.

	0	C30	C31	C20	C23	C25	C22	C24		0	T30	T31	T20	T23	T25	T22	T24
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C30	0	0	447	2700	5000	5800	5800	6600	T30	0	1,22	7,38	13,70	15,90	15,90	18,00	
C31	0	447	0	2600	4900	5600	5700	6500	T31	0	1,22	0	7,11	13,40	15,30	15,60	17,80
C20	0	2400	2300	0	2800	3560	4970	5390	T20	0	6,56	6,29	0	7,65	9,73	13,60	14,70
C23	0	6400	6300	2890	0	1560	2430	2740	T23	0	17,50	17,22	7,90	0	4,26	6,64	7,49
C25	0	6700	6600	4720	2420	0	527	3080	T25	0	18,30	18,04	12,90	6,62	0	1,44	8,42
C22	0	6200	6100	3680	786	816	0	1650	T22	0	16,90	16,68	10,10	2,15	2,23	0	4,51
C24	0	6300	6200	4860	2170	2140	3560	0	T24	0	17,20	16,95	13,30	5,93	5,85	9,73	0

Ejecutada la corrida con la herramienta Gusek, se obtiene en un archivo “.out”, con los elementos informativos del problema (tabla No. 13), donde se detallan los valores referidos a la Subruta diaria de la Ruta R14.

Posterior a la descripción global de la solución obtenida, se visualiza el estado de cada restricción y variable, apreciándose el valor resultante de la evaluación, valores inferiores y superiores de las restricciones y valores máximo y mínimo permitido de las variables.

Tabla No. 11. Tiempo de servicio de clientes (m). Fuente: Foogle Maps. Tabla No. 12. Horario de atención de clientes (m). Fuente: Foogle Maps.

Cliente	Tpo(m)	i	ai	bi
0	0	0	0	480
C30	35	1	60	420
C31	35	2	30	420
C20	70	3	60	480
C23	35	4	30	480
C25	70	5	60	420
C22	70	6	60	300
C24	70	7	0	480

Revisando un extracto de la solución del caso se determina que la primera línea representa el valor de la función objetivo, las restricciones denominadas “dejar” y “entrar” haciendo referencia a que el vendedor abandona y llega a

Tabla No. 13. Eementos del Archivo .out de R14. Fuente: Gusek.

ELEMENTO	SIGNIFICADO	SUBRUTA R14
PROBLEM ROWS	Nombre del archivo que contiene el modelo. Número de restricciones que maneja el modelo, más la función objetivo (funcional).	SubRuta 1 161
COLUMN	Número de variables del modelo (enteros y binarios)	136 (64 integer, 64 binary)
NON-ZEROS	Número de elementos en la matriz distintos de cero (0)	649
STATUS	Cantidad de soluciones posibles	INTEGER OPTIMAL
OBJECTIVE	Valor de la Función Objetivo	9089.1 (Min)

cada cliente una única vez, de allí que las restricciones tiene como actividad el valor de 1 (Ver Fig 5 y 6):

No.	Row name	Activity	Lower bound	Upper bound
1	total	9089.1		
2	dejar(r)	1	1	—
3	dejar(r)	1	1	—
4	dejar(r)	1	1	—
5	dejar(r)	1	1	—
6	dejar(r)	1	1	—
7	dejar(r)	1	1	—
8	dejar(r)	1	1	—
9	dejar(r)	1	1	—
10	entrar(r)	1	1	—
11	entrar(r)	1	1	—
12	entrar(r)	1	1	—
13	entrar(r)	1	1	—
14	entrar(r)	1	1	—
15	entrar(r)	1	1	—
16	entrar(r)	1	1	—
17	entrar(r)	1	1	—
18	r1(0)	70	—	4803
19	r1(1)	0	—	4803
20	r1(2)	360.2	—	4803
21	r1(3)	41.3	—	4803
22	r1(4)	77.9	—	4803
23	r1(5)	71.4	—	4803
24	r1(6)	87.1	—	4803
25	r1(7)	775.8	—	4803
26	r1(8)	0	—	4803
27	r1(1)	374.7	0	4283
28	r1(2)	338.5	0	4283
29	r1(3)	2622.2	0	4803
30	r1(4)	219.3	0	4803
31	r1(5)	775.8	0	4283
32	r1(6)	147.2	0	3803
33	r1(7)	0	0	4803
34	r2(0,1)	-374.7	0	11545.422
35	r2(0,2)	-338.5	0	11545.422
36	r2(0,3)	-2622.2	0	11545.422

Fig5. Extracto de Estado de Restricciones del Modelo en Gusek para SubRuta1 de R14. Fuente: Gusek.

No.	Column name	Activity	Lower bound	Upper bound
40	x(5,0)	0	0	1
41	x(5,0)	0	0	1
42	x(5,1)	0	0	1
43	x(5,2)	0	0	1
44	x(5,3)	0	0	1
45	x(5,4)	0	0	1
46	x(5,5)	0	0	1
47	x(5,6)	1	0	1
48	x(5,7)	0	0	1
49	x(6,0)	0	0	1
50	x(6,1)	0	0	1
51	x(6,2)	0	0	1
52	x(6,3)	0	0	1
53	x(6,4)	1	0	1
54	x(6,5)	0	0	1
55	x(6,6)	0	0	1
56	x(6,7)	0	0	1
57	x(7,0)	0	0	1
58	x(7,1)	0	0	1
59	x(7,2)	0	0	1
60	x(7,3)	0	0	1
61	x(7,4)	0	0	1
62	x(7,5)	1	0	1
63	x(7,6)	0	0	1
64	x(7,7)	0	0	1
65	r1(0)	0	0	1
66	r1(1)	374.7	0	4283
67	r1(2)	338.5	0	4283
68	r1(3)	2622.2	0	4803
69	r1(4)	219.3	0	4803
70	r1(5)	775.8	0	4283
71	r1(6)	147.2	0	3803
72	r1(7)	0	0	4803

Fig 6. Extracto del Estado de las variables del modelo: Sub-ruta No. 1. Fuente: Propia.

También, se detalla que las restricciones r1, r4 y r2, asumen valores de actividad según los tiempos de traslado y tiempos de servicio ya establecido. Del mismo modo, se observa que las variables $X[i, j]$ que toman como actividad el valor de 1, indican que el vendedor recorrerá la distancia existente entre el cliente i y el cliente j ; y que las variables $P[i]$ toman un valor según el momento en que el cliente i es visitado, ya que se van acumulando los tiempos de traslado y de servicio según secuencia del recorrido.

Así en la consola GUSEK, se visualizan también los resultados obtenidos del valor final de la función objetivo, clientes de origen y destino, la distancia entre clientes, tiempo de traslado y tiempo de servicio, que para el caso evaluado (subruta No. 1 de la ruta R14), constata el reporte de una solución factible y óptima, seguido del tiempo de ejecución empleado y el total de memoria usada, tal como se muestra en la Fig 7:

INTEGER OPTIMAL SOLUTION FOUND				
Time used: 0.1 secs				
Memory used: 0.5 Mb (574364 bytes)				
La ruta óptima tiene una longitud de: 9089				
Origen	Destino	Distancia		
0	7	0	0	0
1	0	0	0	0
2	1	446.6	1.2	35
3	2	2300	6.3	35
4	3	2890	7.9	70
5	6	527	1.4	70
6	4	785.5	2.1	35
7	5	2140	5.8	70

Fig 7. Resultados de la Consola Gusek para Subruta No. 1. Fuente: Propia.

5 Análisis de los Resultados

En el caso de la Subruta No. 1, se verifica que para cubrir diariamente a los siete (7) clientes discriminados, en una distancia mínima de 9089,1 m, el vendedor debe ir desde su sitio de habitación hasta el cliente C24, luego al C25, y así al C22, C23, C20, C31 hasta el C30. Igualmente, de la data obtenida para la subruta 1, se puede extraer la planificación semanal de la ruta R14 con el detalle de la secuencia diaria de visita a los clientes (Fig 8), considerando cercanías y horarios de atención, logrando el cumplimiento de las frecuencias de visitas de los diferentes tipos de clientes en una sola semana, permitiendo periodos de holgura (día 5, viernes). Se determina entonces ahorro de distancia y tiempo, si se toma en cuenta que la Ruta 14 se viene recorriendo en 10 días, reportándose más de 50 km en la ruta y tiempos extras.

	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
Recorrido Diario	0 - C24	0 - C21	0 - C26	0 - C2	0 - C1
	C24-C25	C21-C14	C26-C29	C2-C3	C1-C4
	C25-C22	C14-C12	C29-C27	C3-C10	C4-C5
	C22-C23	C12-C7	C27-C28	C10-C11	
	C23-C20	C7-C8	C28-C17	C11-C6	
	C20-C31	C8-C9	C17-C16	C6-C3	
Distancia Total (m)	9089.1	3522	13589	3620	2403
	388	360	453	420	134

Fig 8. Planificación Semanal de la Ruta a partir de las Subrutas diarias. Fuente: Propia.

Se determina en los resultados de las herramientas computacionales, que el modelo reporta la mínima distancia de recorrido de la subruta diaria de una ruta cualquiera (respetando la jornada laboral exigida por ley y los horarios de atención), los clientes por subruta diaria y el recorrido que debe hacerse desde la localización de inicio (0) hasta el primer cliente y así hasta el último de la subruta. También, se puede construir con la data, la planificación semanal de cualquier ruta, a partir de las de las subrutas diarias de forma estructurada, orientando los recorridos bajo un patrón establecido y no de forma intuitiva. La distancia mínima permitira per se, que se logre la distribución de los productos en tiempos mínimos oportunos.

Así, luego de disponer la secuencia de visitas de la Ruta R14, y utilizando la herramienta Google Maps Engine Lite, que permite cartografiar datos de forma sencilla y amigable, se puede representar el mapa de recorrido que debe hacer el vendedor para cubrir la subruta diaria (Fig 9). Vale acotar, que introduciendo los valores de los puntos de referencia y secuencia de recorrido, se elabora el mapa.

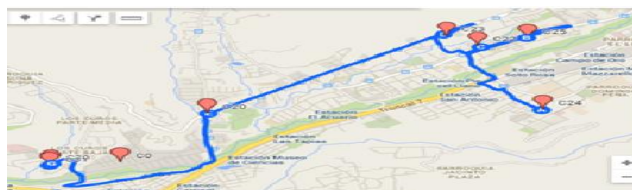


Fig 9. Mapa de Recorrido de la Subruta No. 1. Fuente: Google Maps Lite.

6 Validación del Modelo

Para validar la reproducibilidad del modelo del entorno real, se analiza otra ruta de venta de la empresa para verificar que el mismo, genera valores lógicos y aceptables de distancia y tiempo. Tal ruta corresponde a la R16, conformada por 33 clientes, que implica para la primera fase un total de siete clientes por subruta y el manejo de 1156 variables (34x34). Conociendo los clientes asignados por sub-ruta, se determina mediante la aplicación de la segunda fase, el recorrido mínimo de la misma (4450 m), que resultamuch menor a la reportada por el vendedor (de 7 km) y se genera la secuencia de visitas (Fig 11). En el mapa de recorrido (Fig 12), se visualiza el recorrido desde el punto de inicio (0) al igual que las secuencia del recorrido, y se logra obtener una secuencia lógica para los 33 clientes durante la semana crítica de visita considerando las variantes de la zona, en cuanto a dirección de calles y avenidas, y velocidad promedio de traslado en la zona. Al disponer de la secuencia de visitas, se levanta la planificación semanal (ver Fig 13), verificándose nuevamente tiempo de holgura.

La ruta óptima tiene una longitud de: 4450

Origen	Destino	Distancia	TTraslado	TServicio
0	5	601	1.6	42
1	0	815	2.2	0
2	1	4	0.1	37
3	4	19	0.3	31
4	2	868	2.4	56
5	7	143	2.1	42
6	3	740	2	56
7	6	1260	3.4	42

Fig 11. Resultados de la Consola Gusek: Subruta No. 1 Ruta 16. Fuente: Propia.

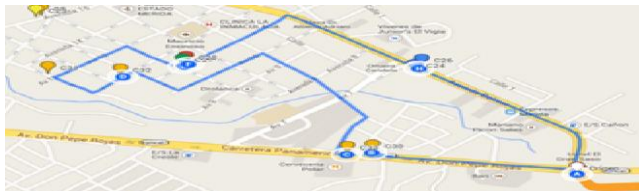


Fig 12. Resultados de la Consola Gusek para Subruta No. 1 Ruta 16. Fuente: Propia.

5 Análisis de Sensibilidad

Para evaluar el grado de variabilidad del modelo, y su comportamiento, se modifican algunas condiciones de trabajo o criterios del proceso de ventas por rutas.

	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5
RECORRIDO DIARIO	C0-C30	C0-C31	C0-C3	C0-C29	C0-C15
	C30-C33	C31-C20	C4-C9	C29-C13	C15-C4
	C33-C32	C20-C23	C9-C18	C13-C17	C4-C10
	C32-C27	C23-C5	C18-C16	C17-C12	C10-C2
	C27-C28	C5-C11	C16-C14	C12-C7	C2-C19
	C28-C26	C11-C21	C14-C6	C7-C1	C19-C0
	C26-C24	C21-C25	C6-C22	C1-C5	
	C24-C0	C25-C0	C22-C0	C5-C0	
TOTAL DISTANCIA (MTS)	4450	5453	9070	6529	13553
TOTAL TIEMPO (MIN)	320.1	347	347.8	332.5	225

Fig 13. Planificación Semanal de la Ruta 16. Fuente: Propia.

Escenario No. 1. Incorporación de los tiempos de traslado desde y hacia el punto de inicio en la Jornada Laboral. Se incluyen en la jornada laboral diaria de la subruta No. 1, los tiempos de traslado entre el origen y el 1er cliente a visitar

al igual que el tiempo de regreso desde el último cliente al origen. Todo ello, conservándose los valores de distancias y tiempos entre clientes, el tiempo de atención a cada cliente y el horario de visita convenido (Ver tablas No. 11 - 15). Así, el modelo arroja una distancia mínima de 16083.6 metros de recorrido y una secuencia diferente de recorrido, como se evidencia en las figuras No. 13 y 14.

Tabla No. 14. Distancia e/ clientes (m). Fuente: Foogle Maps.

	0	C30	C31	C30	C23	C25	C22	C24
0	0	1100	1200	2100	4300	5100	5100	5900
C30	1100	0	447	2700	5000	3800	5800	6600
C31	1200	447	0	2600	4900	5600	5700	6500
C20	1700	2400	2300	0	2800	3560	4970	5390
C23	5000	6400	6300	2890	0	1560	2430	2740
C25	6400	6700	6600	4720	2420	0	527	3080
C22	5100	6200	6100	3680	786	816	0	1650
C24	6400	6300	6200	4860	2170	2140	3560	0

Tabla No. 15. Tiempo de traslado e/ clientes (m). Fuente: Foogle Maps.

	0	T30	T31	T20	T23	T25	T22	T24
0	0	3.01	3.28	5.74	11.80	13.90	13.90	16.10
T30	3.01	0	1.22	7.38	13.70	15.90	15.90	18.00
T31	3.28	1.22	0	7.11	13.40	15.30	15.60	17.80
T20	4.65	6.56	6.29	0	7.65	9.73	13.60	14.70
T23	13.70	17.50	17.22	7.90	0	4.26	6.64	7.49
T25	17.50	18.30	18.04	12.90	6.62	0	1.44	8.42
T22	13.90	16.90	16.68	10.10	2.15	2.23	0	4.51
T24	17.50	17.20	16.95	13.30	5.93	5.85	9.73	0

La ruta óptima tiene una longitud de: 16084

Origen	Destino	Distancia	TTraslado	TServicio
0	1	1100	3	35
1	2	446.6	1.2	35
2	5	5600	15.3	70
3	0	1700	4.6	0
4	3	2890	7.9	70
5	6	527	1.4	70
6	7	1650	4.5	70
7	4	2170	5.9	35

Fig 13. Resultados de la Consola Gusek para Subruta No. 1-Escenario No. 1. Fuente: Propia.



Fig 14. Mapa de Recorrido de Subruta No. 1 con modificaciones de tiempos en jornada diaria. Fuente: Google Maps Lite.

Se evidencia, un mayor recorrido, como era de esperarse al incorporar los tiempos desde y hacia el punto de partida, que obliga a la adición de las distancias. Igualmente, se registran cambios en la secuencia de recorrido, porque el vendedor para hacer recorridos mínimos debe comenzar por uno de los clientes más cercanos para luego dirigirse a los más lejanos, considerando para el regreso algunos de los clientes adyacentes a la ubicación de origen.

Escenario No. 2: Cambios en los horarios de atención de los clientes. Se asume que algunos clientes de la subruta No. 1, establecen horarios de atención en la mañana, y otro grupo, visitas en horas de la tarde, limitando así el proceso de ventas. Se realiza el analisis, manteniendo los datos de entrada de los demás parámetros (distancias y tiempos entre clientes y el tiempo de atención de cada cliente), utilizados para la resolución inicial de la primera sub-ruta (tablas 9-12) pero exceptuando los valores del horario de visita (Tabla 16).

Tabla 16. Horario de atención de clientes-Escenario 1. Fuente propia

i	ai	bi
0	0	480
1	60	300
2	30	300
3	60	300
4	360	480
5	360	420
6	360	420
7	0	300

La ejecución del modelo bajo los cambios del horario de atención del cliente, arroja como resultado un recorrido mínimo de 11.889 m, y una secuencia de visita diferente a la original (Fig 14), puesto que el vendedor debe atender con prioridad a los clientes que establecieron horas de visita durante la mañana, y seguidamente atender los clientes de visitas vespertinas, aún cuando los primeros estén más próximos al punto de partida.

Los resultados indican que el modelo es sensible a las variaciones de los criterios del proceso, como corresponde a la ejecución de la jornada laboral al igual que los horarios de atención, generando cambios en la secuencia de recorrido y las distancias.

La ruta óptima tiene una longitud de: 11889

Origen	Destino	Distancia	TTraslado	TServicio
0	1	0	0	35
1	2	446.6	1.2	35
2	3	2600	7.1	70
3	7	5390	14.7	70
4	0	0	0	0
5	6	527	1.4	70
6	4	785.5	2.1	35
7	5	2140	5.8	70

Fig 14. Resultado de Consola Gusek para Subruta No. 1 - Escenario No. 2. Fuente: Propia.

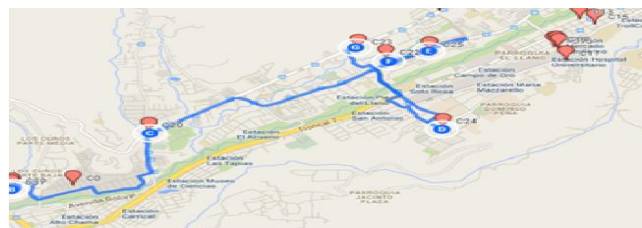


Fig 15. Mapa de Recorrido de Subruta No. 1 con modificaciones en horarios de atención (Escenario 2). Fuente: Google Maps Lite.

6 Conclusiones

El análisis de los resultados obtenidos a partir del modelo de ventas por rutas, para minimizar los recorridos de las visitas de ventas de una distribuidora de productos, permite establecer que los métodos heurísticos de programación lineal “Algoritmo del Vecino más cercano”, así como el

“Problema del Agente Viajero” y el “Problema del Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo” contribuyen en la toma de decisiones para una gestión eficiente de comercialización y distribución, estructurando la planificación de las secuencias de recorrido de ventas, cumpliendo las condiciones legales y políticas de trabajos de las empresa, y minimizando distancias y por ende tiempos y más aún si se dispone gráficamente el recorrido. Así, al evaluar escenarios diferentes del contexto original, se verifica que al modificar los horarios de atención de los clientes y los tiempos de la jornada diaria y semanal de trabajo, se afectan las distancias entre los clientes y por ende las secuencias de atención. El modelo real por su parte, plantea a futuro la incorporación de los costos asociados a la red de distribución en el modelo construido, a manera de considerar los gastos de logística, toma de pedidos y cobranzas, sin obviar que el mismo puede extrapolarse para la optimización de las rutas de despachos de productos, determinando los tiempos de descarga y entrega, que mejoren la logística de comercialización y distribución de productos.

Referencias

- Baca Gabriel, 2001, Evaluación de Proyectos. Cuarta edición. México: McGraw-Hill.
- Cadillo J, 2011, Estudio comparativo de la aplicación de heurísticas al problema de ruteo de vehículos. Master's thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Cordeau F, 2001, Vrp with time windows. In Toth, P. y Vigo, D., editors, The Vehicle Routing Problem, chapter 7, pp: 157–193.
- Dantzig G, 1958, .Solution of a large-scale traveling salesman problem. Operations Research Society of America, 2(4):393–410.
- Díez de Castro E, 1997. Distribución Comercial. Mc Graw-Hill, México.
- Ferrer L, 2006, Algoritmo de asignación de visitas a puntos de ventas a rutas y de optimización de las rutas resultantes. Technical report, Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales. Universidad Politécnica de Cataluña, Valencia.
- Ferrer L, Coves A, De Los Santos M, 2004, Modelado del Transporte de Distribución Mediante Programación Lineal Entera. Scielo, Información Tecnológica-Vol. 15 N°4-2004, pp: 65-69.
- Gómez R, Zuluaga A, Espinoza J, 2015, Modelamiento de distribución de productos cárnicos como un TSP (Travel-Salesman Problem) con Teoría de Grafos. Clío América, Vol. 9 No. 17 Pág. 8-16.
- Louis WS, 1999, Canales de Distribución. Pearson Educación, 5 edición.
- Makhonin A, 2000, Glpk (kit de programación de gnu lineal). <http://www.gnu.org/software/glpk/>.
- Martí R, 2003, Procedimientos meta heurísticos en optimización combinatoria. Matematicas, 1(1). pp:3–62.
- Olivera A, 2004, Heurísticas para problemas de ruteo de

vehículos. Technicalreport, Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Puchades V, 2008, Aplicación de la teoría de grafos para mejorar la planificación de rutas de trabajo de una empresa del sector de la distribución automática. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y Empresa*, pp:7–22.

Sanchis R, Póler R, Ortiz A, 2009, Técnicas para el Modelado de Procesos de Negocio en Cadenas de Suministro. *Scielo, Información Tecnológica-Vol. 20 N°2-2009*, pp: 29-40.

Sanguino R, 2001, El sistema de distribución comercial. Disponible en Internet: <http://www.5campus.org/leccion/districom/>.

Yopez, Sara: *MSc en Ingeniería de Mantenimiento (ULA, 2009), profesora asistente de la catedra de Gerencia y Producción de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Los Andes. Prof. del Postgrado de Ingeniería de Mantenimiento de la ULA e integrante del Grupo de Investigación GRUTEC-ULA.*

Márquez, Renny.: *MSc en Modelado y Simulación de Sistemas (2010), profesor asistente del Área de Investigación de Operaciones de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Los Andes. Correo electronico: renny-marquez@ula.ve*

Calderón, Ana: *Ingeniero de Sistemas, 2015. Analista de Sistemas de la Empresa Distribuidora El Campesino, Edo. Mérida. Correo electronico: acalderon@gmail.com*

Capítulo 41

Un agente para la gestión de entornos inteligentes

Rivero, Dulce M^{1,2*}; Narvaez, David¹; Arciniegas, Stalin¹

¹Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ibarra, Ecuador

²Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Merida, Venezuela.

*dmrivero@pucesi.edu.ec, milagro@ula.ve

Resumen

Este trabajo presenta el diseño de un agente para el control del ambiente en un salón de clases inteligente. El agente identifica a los usuarios que se encuentra en el salón de clases y adecua el salón en base a condiciones de luminosidad, ruido y temperatura existentes. Este agente, para controlar su entorno, coopera con otros agentes, informando de las actividades que se realizan dentro del salón. Esta información permite al agente del entorno decidir las acciones a realizar para que las condiciones de luz y temperatura sean las adecuadas. Los ambientes inteligentes son un paso adelante en la automatización de los procesos de enseñanza, conocidos como salones inteligentes. En estos ambientes se integran tecnologías como la microelectrónica, sensores, inteligencia artificial, tecnología de comunicación y tecnologías multimedia que permiten crear espacios más personalizados y adecuados para los procesos de enseñanza-aprendizaje. A partir del diseño se construyó un agente que ejecuta las acciones necesarias para mantener el entorno en condiciones óptimas de acuerdo a las actividades de enseñanza que se están impartiendo en ese momento. Para decidir qué acciones debe ejecutar, el agente utiliza los datos obtenidos del mundo real a través de la red sensores que se encuentran distribuidos dentro del salón, los datos de su estado interno y la información recibida de otros agentes. Además, se incluye una cámara, con un módulo de reconocimiento de personas para identificar quienes están en el salón, información que es compartida con los otros agentes que cooperan, con el objeto de ayudar a decidir las acciones a tomar.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

Los rápidos avances en materia de Hardware y redes inalámbricas están permitiendo el desarrollo de nuevas formas de interactuar con el medio, en la que pequeños dispositivos inalámbricos facilitan el acceso a la información en cualquier momento y lugar (Computación Ubicua). Estos dispositivos son necesarios para la creación de un Ambiente Inteligente (AmI), en los que las redes inalámbricas de sensores juegan un papel fundamental para la percepción, captación y distribución de los datos obtenidos (Archilay col., 2013, Morillo y col., 2013)

Existen diferentes definiciones de AmI, en todas éstas existen un conjunto de características que son comunes, tales como ser ambientes sensitivos, que responden, se adaptan, son transparentes, ubicuos e inteligentes. Por lo que se puede decir que los AmI son espacios dotados de dispositivos y sensores que se comunican y colaboran entre sí, con el propósito de adaptar su entorno a las necesidades de las personas que se encuentran realizando alguna actividad, creando espacios más confortables y agradables, mejorando la productividad y satisfacción de las mismas, todo ello de manera transparente y no intrusiva.

Los AmI utilizan los dispositivos más adecuados para reconocer su entorno y ofrecen información (quienes están, donde están, temperatura del ambiente) de forma oportuna, la que permite tener una visión simplificada del entorno (Ríos 2014). Un entorno inteligente confía en los datos sensoriales obtenidos del mundo real, estos datos provienen de una variedad de sensores de múltiples propósitos distribuidos en el medio. Adicionalmente, un AmI requiere de la información de su estado interno y la información que otros agentes pueden ofrecer del mundo externo, con esta información se toman las acciones más adecuadas para mantener en condiciones agradable el AmI.

Dado que los AmI son espacios físicos del mundo real, el uso de sensores es vital, éstos son el enlace calve entre los algoritmos computacionales y las aplicaciones físicas. Los sensores son dispositivos que le permiten a un agente computacional tomar los datos del mundo real, su entorno, y utiliza esta información para razonar sobre su ambiente y tomar las acciones adecuadas. Adicionalmente, la identificación y seguimiento de personas es un aspecto importante en AmI.

Los AmI han tenido un impacto importante en muchos dominios, como hospitales oficinas y educativos entre otros. Los AmI en dominios educativos se conoce como salones inteligentes (SaI). Estos son espacios caracterizados por facilitar el acceso a la información, enriqueciendo sus espacios de aprendizaje. Un SaI debe generar un entorno adecuado y confortable, a fin de mejorar el rendimiento y el proceso de aprendizaje del estudiante.

Los trabajos en este campo son extensos, en la literatura se encuentra propuestas para que abordan este problema desde diferentes perspectivas, en unos casos se centran en el uso de dispositivos aumentados para el desarrollo de las ac-

tividades en clase, como es el caso de AmI-DesK desarrollado por Antona et al. (2010). Xie et al. (2001) abordan el problema de la enseñanza remota y local, ofreciendo la posibilidad de interactuar como si se estuviera físicamente en el salón. El profesor y los alumnos que se encuentran de manera local interactúan a través de un pizarrón interactivo y de lápices digitales para hacer anotaciones que lo estudiante remotos pueden visualizar.

Otros trabajos se han dedicado al desarrollo de herramienta que muestre a los profesores la información del estudiante. Leonidisy col., (2010) proponen ClassMate, un *framework* abierto para Ambientes Inteligentes en educación, entre sus características están interoperabilidad de los servicios del ambiente, comunicación síncrona y asíncrona, capacidad de adaptación y seguridad. Adicionalmente, se encuentran trabajos que presentan modelos conceptuales para salones inteligentes como es el caso del diseño de la arquitectura para salones inteligentes basada en un modelo de capas propuestos por Hernandez y col.,(2014) y las arquitecturas basadas en agentes (Ovalles y col., 2006).

Otros autores se enfocan en la percepción del ambiente mediante el uso de sensores y actuadores, tal como iClass (Ramadan y col., 2010, Altamirno y col., 2010) el cual es un ambiente inteligente donde, a un salón, se integran un conjunto de sensores embebidos, actuadores, procesadores y una red heterogénea, creando un espacio multiusuario, dentro de este enfoque se ubica el presente trabajo.

En este trabajo se presenta el diseño de un agente para el control del entorno de un SaI, sus características más importantes son la identificación de los usuarios que se encuentra en el salón de clases, información requerida por otros agentes del SaI (Rivero y col., 2016) adecua el salón en base a condiciones de luminosidad, ruido y temperatura existentes. Este agente, para controlar su entorno, coopera con otros agentes, informando de las actividades que se realizan dentro del salón. Esta información permite al agente del entorno decidir las acciones a realizar para que las condiciones de luz y temperatura sean las adecuadas.

El resto de este trabajo está organizado en sesiones. En la sección dos se presentan los conceptos de base que soportan este trabajo como que es una red de sensores inalámbricos, tipos de sensores. En la sección tres se listan los requerimientos que se tomaron en cuenta para el diseño del agente y en la sección cuatro se describe el diseño del agente del entono, describiendo la red de sensores inalámbricos utilizada para la captura de los datos del entorno y el diseño de los componentes del agente. Finalmente, en la sección quinta las conclusiones y trabajos futuras son presentados.

2 Marco Teórico

2.1 Redes de sensores inalámbricos

Una red de sensores inalámbricos (WSN) se define como una red de característica configurable integrada por un conjunto de nodos sensores, distribuidos, que colaboran

en una tarea común. Están formadas por un grupo de sensores con capacidades adquisición de datos (sensoriales) y de comunicación.

Las redes de sensores es un concepto relativamente nuevo, usado para la adquisición y tratamiento de datos en muchas aplicaciones, como entornos industriales, domótica, entornos militares, detección ambiental. Los sensores imitan la capacidad de percepción de los seres humanos, por ello se encuentran una variedad de sensores asociados a cada sentido: sensores de visión e iluminación que emulan la vista, sensores de ruido, sonidos que imitan el oído, sensores de contacto que reproducen el tacto, entre otro. Por lo tanto, los sensores son dispositivos electrónicos que permiten interactuar con el entorno, proporcionando datos que una vez procesados permiten tomar las acciones adecuadas.

Una red de sensores inalámbrica es una infraestructura compuesta de muchos nodos sensores, cada uno equipados con microcontrolador, una fuente de energía (casi siempre una batería), un radio transceptor (RF) y un elemento sensor (fig. 1), con autonomía y distribución física con capacidades de comunicación inalámbrica limitadas. Son dispositivos de bajo coste y consumo, capaces de obtener información de su entorno, procesarla localmente, y comunicarla a través de enlaces inalámbricos hasta un nodo central de coordinación.

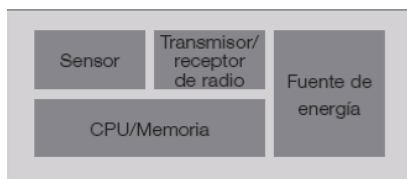


Fig. 1. Estructura de un nodo sensor. (Introducción a las redes inalámbricas de sensores (WSN) s.f.)

Las redes de sensores inalámbricas ofrecen velocidades de transmisión relativamente bajas con enlaces de corto alcance. Se caracterizan por ser redes desatendidas (sin intervención humana), con alta probabilidad de fallo (en los nodos, en la topología), habitualmente construidas ad-hoc para resolver un problema muy concreto (es decir, para ejecutar una única aplicación). Una ventaja de las arquitecturas basadas en redes de sensores inalámbricas es su escalabilidad

Existen diferentes redes de sensores inalámbricas y cada red utiliza sus propios estándares, protocolos y formatos de representación de datos. Sin embargo, existen un conjunto de características, independientes del tipo de red, que son deseables, estas son: (Morillo y col., 2013)

- Fácil instalación.
- Auto-identificación.
- Auto-diagnóstico.
- Confiabilidad.
- Coordinación con otros nodos.

- Funciones software y de tratamiento digital de la señal.
- Protocolos de control y de interfaz de red estándares.

En el resto de esta sección se describen las tecnologías utilizadas en el trabajo

2.2 Tecnologías inalámbricas estándares: ZigBee

Los estándares inalámbricos más conocidos son: para redes LAN el IEEE 802.11b (“Wifi”) y para redes PAN el protocolo IEEE 802.15.1 (Bluetooth IEEE, 2002) e IEEE 802.15.4 (ZigBee IEEE, 2003).

Zigbee es un protocolo de comunicaciones inalámbricas diseñado por la Zigbee Alliance, creado para solventar necesidades del mercado de un sistema a bajo coste y solventar problemas de interoperabilidad y duración de baterías, siendo ideales para redes domóticas. Zigbee brinda seguridad en la comunicación con tasas bajas de transmisión de datos (Low-RateWireless Personal Area Network LR-WPAN) y la comunicación se realiza en banda libre de 2.4 GHz a través de una frecuencia única.

Según la función que cumplan en la red, se definen tres tipo de dispositivos ZigBee (Oyarce 2010); el primero es el **coordinador o nodo raíz**, éste tiene la función de formar la red, además establece el canal de comunicaciones y del PAN ID (identificador de red), también puede realizar funciones como Router, es decir, que participa en el enrutado de paquetes y es origen y/o destinatario de información. Además, es el responsable del arranque y configuración de los parámetros de red, admisión de nodos y asignación de direcciones de red; el segundo, denominado **routers** es un nodo que crea y mantiene la información sobre la red, también determina la mejor ruta para transmitir un paquete de información. La función principal es retransmitir paquetes de otros router o de un dispositivo final (*EndDevice*), previa unión a una red Zigbee; finalmente los dispositivos finales, estos, por no tener la capacidad de enrutar paquetes o enviar información directamente a otro enddevice, sólo puede interactuar a través de su nodo padre.

La capa de red soporta algunas configuraciones tal como se muestran en la figura 2, estas son (Dignani 2011):

Topología Estrella: se caracteriza por tener un coordinador con uno o varios nodos hijos, su alcance está limitado al rango de transmisión del coordinador, la configuración es muy sencilla, y el coordinador es el único nodo que rutea paquetes.

Topología Árbol: en esta topología los nodos ruteadores pueden tener nodos hijos con una comunicación directa entre ellos, un ruteo jerárquico y un único camino.

Topología Malla: se destaca porque los nodos ruteadores pueden tener nodos hijos, además los terminales solo pueden intercambiar datos con sus respectivos nodos padres, y es posible el ruteo dinámico.

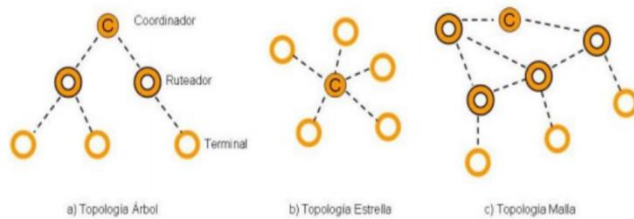


Fig. 2. Tipos de topología. (Dignani, 2011.)

2.2 Arduino

Arduino es una placa con un microcontrolador y un Entorno de desarrollo Integral (IDE) que facilita la programación de dispositivos electrónicos. Se utiliza para desarrollar objetos interactivos, teniendo las entradas de una variedad de interruptores o sensores, y el control de una variedad de actuadores, motores, y otras salidas físicas. Una placa arduino puede comunicarse con una aplicación software que se ejecuta en un ordenador a través de un puerto de comunicación serial universal USB.

2.3 Sensores

Los sensores son de distinta naturaleza y tecnología, toman del medio la información y la convierten en señales eléctricas. Existen placas con sensores de medida de muy diversos parámetros, como sensores de presión barométrica, GPS, movimiento, luz, medida de radiación solar, humedad en suelo, humedad aire, temperatura, sonido, velocidad del viento, etc.

Sensores de movimiento: son dispositivos que transmiten y reciben radiaciones, los sensores accionan sus contactos cuando detectan variaciones de movimiento en las señales captadas, que posibilitan el accionamiento de diferentes dispositivos interconectados. Algunos sensores de movimiento son: los sensores infrarrojos detectan el cambio de un ambiente a través de la temperatura de los cuerpos; sensores ultrasónicos, capaces de captar variaciones en el espacio a través de una onda ultrasónica que recorre el ambiente y vuelve al detector rebotando en cada objeto que se encuentra en el ambiente. Si el dispositivo detecta un nuevo objeto se activa.

Sensor de iluminación: son dispositivos que registran los niveles de luminosidad, su valor varía dependiendo de la luz. A medida que recibe más intensidad luminosa su resistencia va disminuyendo dentro de este tipo de sensores se tienen: sensores reflectivos y por intercepción, están basados en el empleo de una fuente de señal luminosa y una célula receptora del reflejo de esta señal, que puede ser un fotodiodo, un fototransistor, LDR, incluso chips especializados, como los receptores de control remoto.

Sensores de temperatura: son dispositivos que miden la temperatura del aire. Existe una gran variedad de senso-

res de temperaturas; termocuplas, termistores, termómetros infrarrojos, termoresistencia, siendo el más utilizado las termocuplas.

Sensores de sonido: El ruido se puede definir como un sonido no deseado. Las ondas sonoras se originan por la vibración de algún objeto, que a su vez establece una sucesión de ondas de compresión o expansión a través del medio que las soporta. El sonido se puede definir en términos de las frecuencias que determinan su tono y calidad, junto con las amplitudes que determinan su intensidad.

Los sensores de sonidos son interruptores eléctricos que trabajan sin contacto. Cuentan con un micrófono sensible diseñado para mostrar las formas de onda de audio de los niveles de ruido entre 45 y 100 dB, los sensores ultrasónicos unidireccionales y los sensores ultrasónicos de reflexión o bidireccionales son ejemplos de este tipo de sensores

2.4 Reconocimiento facial

El reconocimiento facial automatizado busca identificar a una persona por medio de la imagen de su rostro intentando emular el proceso cognitivo que realiza un ser humano al reconocer a sus pares.

Durante los últimos años, los sistemas biométricos se han convertido en uno de los sistemas más utilizados en campos como la biometría, el procesamiento de imagen o el reconocimiento de patrones.

2.4.1 EMGU CV

Es un paquete de plataforma de punto net con una biblioteca de procesamiento de imágenes similar a OPEN CV. Permite funciones del OPEN CV para ser llamados en lenguajes compatibles en punto net como: C#, VB, VC++ y IronPhyton, entre otros y se le puede ejecutar en diversas plataformas como: Windows, Linux, Mac OSX y sistemas móviles.

3 Análisis

Los principales requerimientos que se tuvieron en cuenta para el diseño de la red inalámbrica de sensores y del agente fueron:

Identificación de personas: el agente debe identificar a las personas que se encuentran en el salón y así verificar si están autorizados para acceder a esa hora.

Control de la temperatura: se deben tomar la temperatura del entorno y tomar las decisiones oportunas de acuerdo a las reglas predefinidas.

Control de la luminosidad: de acuerdo a las actividades que se vayan a realizar en el salón, el agente debe acondicionar el entorno a los niveles de luminosidad requeridos de acuerdo a las reglas establecidas.

Control de ruido: si los niveles de ruido superan los establecidos para las actividades que se estén realizando, el agente deberá indicarlo de alguna forma.

Control de movimiento: el agente debe detectar que en el entorno no hay personas, y en ese caso deberá apagar los equipos y la iluminación.

4 Diseño del agente de entorno

El agente de control del entorno consta de componentes tanto de hardware como de software. Dentro del hardware se incluye la red de sensores inalámbricos, encargados de la adquisición de los datos. En el software se definen todos los componentes necesarios para procesar la información adquirida por los sensores y en base a ésta decidir las acciones que se deben tomar para mantener un ambiente en condiciones confortables en el salón de clases.

4.1 Diseño de la red de sensores

Para adquirir la información del entorno se diseñó una red de sensores inalámbrica, encargada de detectar la luminosidad, el ruido y la temperatura del salón de clases. El agente, para conectarse a la red de sensores, utiliza una conexión Zigbee con el protocolo IEEE 802.15.4 y una comunicación serial, a través de la librería incluida en el IDE del Arduino. El diseño de la red de sensores se presenta en la figura 3, en ésta se distinguen los siguientes componentes: (A) sistema embebido Arduino, (B) indicadores de iluminación led, (C y F) sistema de sensores, (D) sistema de ventilación junto al actuador electromecánico, (E) luminarias tipo foco LED.

Adicionalmente, la conexión es utilizada para enviar las acciones a los actuadores, responsables de cambiar la intensidad de la luz, la apertura y cierre de las cortinas y el control de la temperatura. Asimismo, para controlar los niveles ruido superior a los establecidos dentro del salón, el agente envía notificaciones al docente, alertando y solicitando al profesor realizar alguna acción para disminuir el ruido.

Adicionalmente, la red de sensores, para la alimentación de los dispositivos de iluminación, utiliza dos fuentes de energías, solar y eléctrica, tal como se muestra en la figura 4, donde se distinguen los componentes: (A) panel solar, (B) conmutador de fuentes de alimentación, (C) regulador de voltaje AC/DC, (D) controlador de alta potencia eléctrica, (E) luminarias LED, (F) sistema embebido Arduino, (G) radio de comunicación inalámbrica y serial, (H) pantalla de visualización lcd gráfica

4.2 Diseño del agente

El agente de gestión del entorno, tal como se muestra en la figura 5, está compuesto por tres componentes:

El componente de identificación: responsable de dar de alta y de baja tanto a estudiantes como a profesores que estén autorizados para ingresar al salón. Además, a través de una cámara situada al ingreso del salón, el componente identifica a las personas que ingresan al entorno para generar la lista de asistencia y calcular el número de personas presentes, esta información se envía al agente de control del entorno. La lista de presencia es también enviada al agente de enseñanza (ver figura 6).

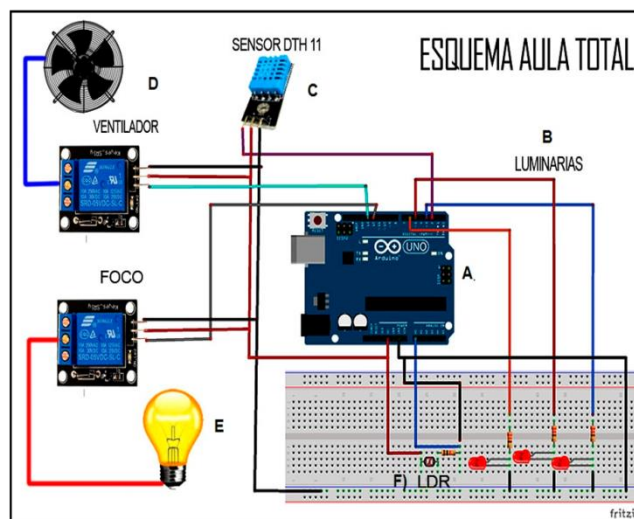


Fig. 3. Diseño de la red de sensores

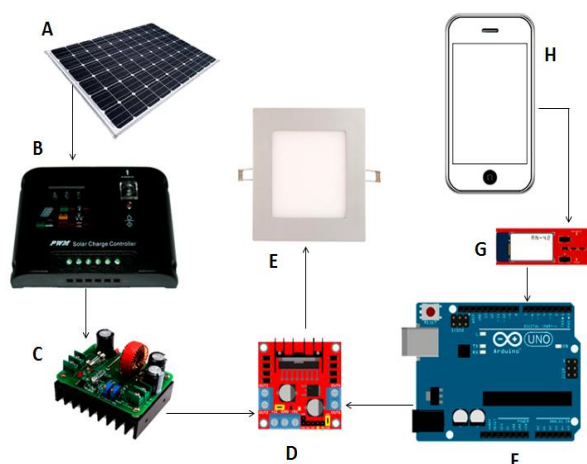


Fig. 4. Diseño del sistema de iluminación

El componente de adquisición de los datos: responsable de conectarse con la red de sensores y adquirir los datos del entorno con el objeto de monitorear las condiciones de luminosidad ruido y temperaturas y verificar estos valores con los valores de los parámetros previamente establecidos (ver figura 7). Cuando se detectan cambios de alguno de los valores establecidos, este componente envía una notificación al componente de control con los valores actuales del

entorno.

El componente de control del entorno: responsable de decidir, en base a la estrategia de enseñanza de la asignatura asignada a ese horario, los valores de los parámetros de luminosidad, ruido y temperatura adecuados. Cuando estos valores difieren de los valores actuales del entorno, el agente ejecuta las acciones necesarias para regular el ambiente. Con el objeto de alcanzar una mayor escalabilidad, la ejecución de cada comando se desacopla en clases individuales (ver figura 8).

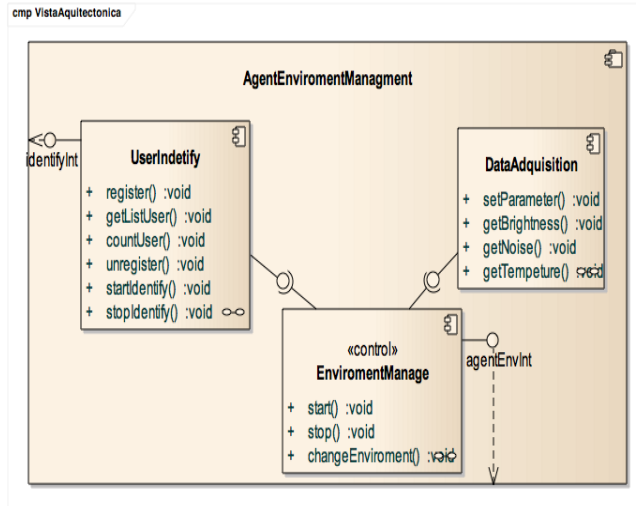


Fig. 5. Componentes del Agente de control del entorno

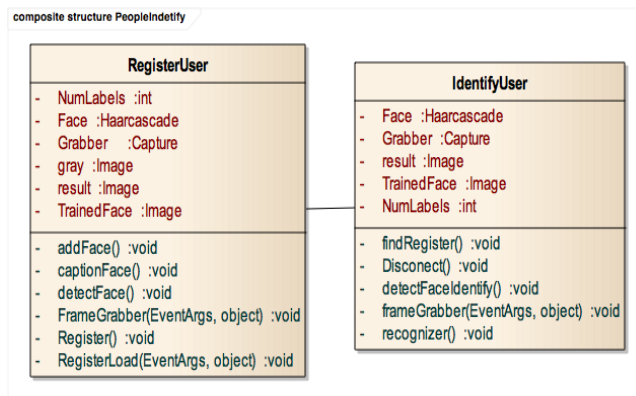


Fig. 6. Componentes de registro e identificación de usuarios

El componente de control del entorno utiliza la información que recibe del agente de aprendizaje y enseñanza (Rivero y col., 2016) y junto con las reglas de condiciones óptimas del entorno, mostradas en la tabla 1, define los valores de los parámetros del entorno. Además, con la información suministrada por el componente de identificación y adquisición de datos y en base a su estado interno decide las acciones a ejecutar a fin de mantener el salón en condiciones óptimas.

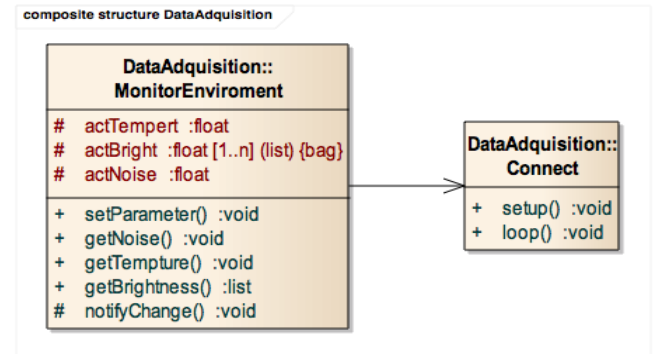


Fig. 7. Componente de adquisición de datos

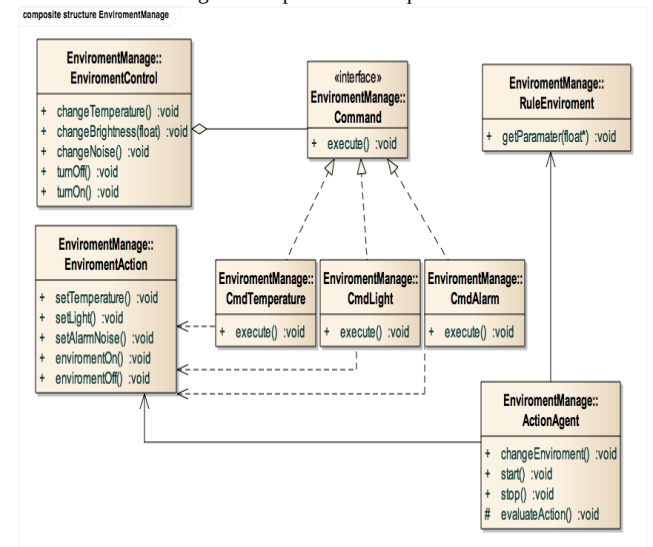


Fig. 8. Componentes de control del entorno

Para la construcción del agente se utilizó el IDE de visual studio 2015 y el lenguaje de programación c# para desarrollar el agente de entorno, así como la librería basada en Open CV llamada Emgu CV para el proceso de reconocimiento facial y la librería para la conexión bluetooth. La figura 9 muestra la interfaz del registro de usuarios del componente identificación de usuario

Tabla1. Condiciones del ambiente

Estrategia	Hora-rio	Tem-p	Luz	Rui-do
Video	17:00	23	80	80
Video	20:00	24	100	80
Presentación	12:00	22	0	50
Presentación	18:00	22	80	50
Presentación	20:00	24	100	50
Clase Mag	12:00	23	300	40
Clase Mag	18:00	23	400	40
Clase Mag	20:00	25	500	40

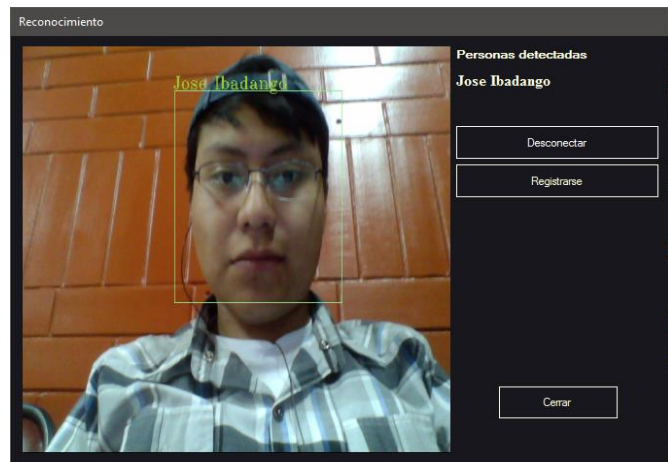


Fig. 9. Interfaz de registro de usuarios

5 Conclusiones y trabajos futuros

Se ha presentado el diseño de la red de sensores y el diseño de la arquitectura software del agente, las funciones principales del diseño, registro y captura de usuarios, adquisición de datos y acciones de control, han sido implementadas, permitiendo validar que el diseño satisface los requisitos que se establecieron en la fase de análisis.

Los próximos trabajos se concentrarán en la identificación de y ubicación de los usuarios dentro del salón del salón de clases, información necesaria para el agente de aprendizaje así como para el agente de control, la cual le permitirá saber cuándo el salón está desocupado y ocupados, pudiendo tomar acciones adecuadas a estas situaciones.

Agradecimiento

El presente trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto “Plataforma Inteligente en ambientes Educativos: Caso Dirección de Estudiante PUCESI” de Centro de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Ecuador Sede Ibarra (PUCESI).

Referencias

Antona M, Margetis G, Ntoa S, Leonidis A, Korozi M, Paparoulis G, Stephanidis C, 2010, Ambient Intelligence in the classroom: an augmented school desk. In W. Archila-Córdoba D. M., & Santamaría Buitrago F. A. (2013). Estado del arte de las redes de sensores inalámbricos. Revista digital TIA, 2(1), 4-14.
Dignani JP, 2011, Análisis del Protocolo Zigbee. Trabajo Integrador de Especialización, Universidad Nacional de la Plata, Argentina. Obtenido de http://postgrado.info.unlp.edu.ar/Carreras/Especializaciones/Redes_y_Seguridad/T

jos_Finales/Dignanni_Jorge_Pablo.pdf

Hernández JG, Guerreiro EB, 2014, Ambientes Inteligentes en Contextos Educativos: Modelo y. Research in Computing Science, 55-65.

Introducción a las redes inalámbricas de sensores (WSN). www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf. Fecha de consulta Febrero 2016

Karwowski, Salvendy G, (Eds.), Proceedings of the 2010 AHFE International Conference (3rd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics), Miami, Florida, USA

Leonidis Asterios, Margetis George, Antona Margherita, Stephanidis Constantine, 2010, ClassMATE: Enabling Ambient Intelligence in. World Academy of Science, Engineering and Technology, 581-584

Morillo H, Maciá F, Jorquera D, 2013, Redes Inalámbricas de Sensores Inteligentes. Aplicación a la Monitorización de Variables Fisiológicas.

Oyarce A, 2010, Guía del Usuario, Xbee-Guía del Usuario. Santiago de Chile, Chile

Ovalles Demetrio Arturo, Jimenez Jovani Alberto, 2006, Ambiente inteligente distribuido de aprendizaje: integración de ITS y CLSC por medio de agente pedagógicos. Revista de la Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA), 89-104

Ramadan Rabie A, Hagrah Hani, Nawito Moustafa, El Faham Amr, 2010, The Intelligent Classroom: Towards an Educational Ambient Intelligence Testbed. Sixth International Conference on Intelligent Environments, IEEE. 344 - 349

Ríos Moreno JG, 2014, <http://hdl.handle.net/123456789/2174>. Fecha de consulta diciembre 2015

Electrónica fácil <https://www.electronicafacil.net/tutoriales/Banda-Base-dispositivos-Bluetooth.php>. co. Fecha de consulta febrero 2016

Weikai Xie, Yuanchun Shi, Guanyou Xu, Dong Xie, 2001, Smart Classroom - an Intelligent Environment. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 662-668

Rivero, Dulce: Doctor en Tecnologías Industriales, en Ingeniería de Sistemas y Automática, 32 publicaciones, 2 capítulos de libro, reconocimientos nacionales, participación en proyectos de investigación nacionales e internacionales

Narvaez, Luis: MSc en Tecnologías para la gestión y práctica docente, 3 publicaciones, 4 capítulos de libro. Correo electrónico: ldnarvaez@pucesi.edu.ec

Arciniegas, Stalin: MSc en Tecnologías para la gestión y práctica docente, 4 publicaciones, 5 capítulos de libro. Correo electrónico: smarciniega@pucesi.edu.ec

Capítulo 42

Módulo supervisor basado en la técnica de superficie deslizante para un controlador paramétrico de matriz dinámica

Valverde, Luis¹; Camacho, Oscar^{*1,2}; Iglesias, Edinzo¹; Calderón, Silvia¹; Rosales, Andrés²

¹Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.

²Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

*ocamacho@ula.ve, oscar.camacho@epn.edu.ec

Resumen

Los procesos industriales no lineales no pueden controlarse por técnicas tradicionales como el PID, sino que requieren estrategias avanzadas como el SMC, SlidingMode Control, y el DMC, Dynamic Matrix Control, cuya eficiencia disminuye cuando el comportamiento del proceso real se aleja del punto de identificación original, ya que no pueden actualizar los parámetros dinámicos del modelo en su ley de control. El PDMC, Parametric Dynamic Matrix Control, surgió como una alternativa de mejora en estos casos, al incorporar un módulo supervisor basado en lógica difusa que permite identificar y estimar los cambios sufridos por los parámetros dinámicos del proceso, con el objetivo final de actualizar su modelo. En este estudio se propone la implementación de un nuevo módulo supervisor para el PDMC basado en el comportamiento de la superficie deslizante (PDMC+SMC). El controlador fue probado en un lazo de control de un tanque de mezclado, un sistema industrial típico, altamente no lineal y con grandes retardos. Luego de una secuencia de cambios, el PDMC+SMC mostró estabilidad, siguió los cambios en el punto de referencia, rechazó las perturbaciones, y logró disminuir en un 27% el IAE del SMC, y en un 69% el IAE del DMC. La reducción del ICE para los mismos casos fue de 25% y del 75%, respectivamente.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

Los sistemas con fuertes no linealidades representan un desafío para el control automático de procesos a nivel industrial. Las estrategias tradicionales como el PID, fallan en el seguimiento de los valores de referencia para estos sistemas, que además son los predominantes en la industria química. La presencia de retardos en lazo de control se considera también como uno de los problemas más comunes en la industria de procesos. Cuando el retraso de tiempo se localiza a la entrada del sistema, una estrategia normalmente usada es eliminar el efecto de la señal retardada para obtener un sistema libre de retraso. Está claro que este método solo trabaja en el caso de retrasos suficientemente pequeños. Un método alternativo consiste en la aproximación del operador de retardo por medio de la aproximación de una serie de Taylor o el uso de aproximaciones de Padé (González 2011). En el caso de sistemas lineales, la estrategia clásica a usar es el Predictor de Smith (Smith 1957), conocido como SPC, que mejora el desempeño del controlador proporcionando una estimación futura de la señal. Sin embargo, las mejoras logradas por este sistema de control dependen de la bondad del modelo utilizado para describir el proceso (Normey y col., 2007). El predictor Smith (SPC) es una primera aproximación a lo que después se conocería como Control Predictivo basado en Modelos, por sus siglas en inglés Model Predictive Control, MPC. El MPC usa un modelo dinámico simple del proceso para predecir el efecto de las acciones futuras de control en la salida del sistema. Las técnicas MPC incluyen una serie de algoritmos entre los cuales se destaca el Controlador de Matriz Dinámica, Dynamic Matrix Control, DMC, desarrollado a finales de los setenta por Cutler y Ramaker con base en un modelo numérico de la respuesta dinámica del proceso almacenada matricialmente (Cutler y Ramaker 1979). Entre sus ventajas se cuenta su flexibilidad para manejar sistemas con dinámicas complejas, sistemas multivariable, y sistemas con grandes retardos, ya que su modelo matemático no es fijo, sino que se construye a partir de la respuesta dinámica real del proceso. Su principal desventaja es la de ver limitada su flexibilidad ante procesos altamente no lineales; que no pueden ser fielmente representados por su ley de control basada en un sistema de ecuaciones lineales único para todo el rango de operación. Algunas de las alternativas de mejora para el DMC se centran en dos puntos, mejoras en la forma para hacer frente a las no linealidades en los sistemas MIMO con fuertes interacciones entre variables (Lundstromy col., 1995) y mejoras en el ajuste de parámetros de control para el horizonte y el factor de supresión con el fin de evitar la fluctuación y disminuir la frecuencia de ejecución (Islam y col., 2014). El Controlador de Matriz Dinámica Paramétrico, por sus siglas en inglés Parametric Dynamic Matrix Control, PDMC desarrollado por Iglesias et al (Iglesias 2006) se cuenta entre último grupo, puesto que modifica la estructura del DMC aislando los parámetros dinámicos característicos (K_p , τ , t_0) de tal forma que pueden actualizarse

fácilmente para responder con rapidez a las fuertes variaciones observadas en procesos altamente no lineales.

El control por modos deslizantes, por sus siglas en inglés *Sliding Mode Control*, SMC, es otra opción planteada para manejar sistemas no lineales. Es un tipo de Control por Estructura Variable, que fue desarrollado en la Unión Soviética en la década de los 60 por Utkin (Utkin, 1992) para el control de sistemas no lineales, variantes en el tiempo y sistemas con incertidumbre. Presenta inconvenientes en sistemas con elevado retardo en donde la respuesta del sistema controlado es lenta y se desmejora su desempeño (Camacho y col., 2000).

Este trabajo presenta una combinación de dos técnicas de control: el Controlador de Matriz Dinámica Paramétrica, PDMC (Iglesias 2006), y el control por modo deslizante (SMC) (Camacho y col., 2000), para generar una nueva opción, que aprovechando lo mejor de ambas técnicas, ofrece mayor robustez en el manejo de sistemas no lineales. El SMC se usa como identificador de las no linealidades del proceso, permitiendo generar la matriz de respuesta que será usada por el PDMC para actualizar el modelo.

La contribución de este estudio es la de proponer un sistema de identificación en línea para determinar los cambios en (K_p , τ , t_0) a partir de parámetros característicos de la respuesta simple del proceso ante una perturbación. El uso de este identificador permitiría a nivel industrial mantener el buen desempeño del lazo de control, sin tener que detenerlo para hacer identificaciones adicionales en condiciones cambiantes de la dinámica del proceso. Todo conduce a una mejora en la productividad industrial, puesto que al tener un lazo de control estable y robusto, los procesos permanecen menos tiempo fuera de las especificaciones, con ahorros sustanciales en materia, energía y tiempo, que redundan en una reducción de su impacto ambiental.

Este trabajo está dividido de la siguiente manera, la sección 2 presenta al controlador PDMC, en la sección 3 se desarrollan las bases del SMC, la sección 4 describe la metodología para obtener las ecuaciones del identificador, la sección 5 puntualiza resultados de simulación, donde el esquema propuesto es aplicado a un proceso químico no lineal con la presencia de tiempo muerto variable; en esta sección se hacen comparaciones con DMC y SMC, y finalmente se presentan las conclusiones.

2 Controlador PDMC

El DMC convencional fue ideado como estrategia para trabajar con sistemas lineales, o procesos con pequeñas desviaciones de comportamiento no lineal alrededor del punto de operación. Desafortunadamente, los procesos industriales son complejos, con características no lineales, y pueden llegar a ubicarse lejos de las condiciones de operación, a las cuales se sintonizan los controladores. Este hecho limita el uso del DMC, puesto que se han reportado respuestas no satisfactorias por su lentitud y/o inestabilidad

(Georgiou y col., 1988, Peterson y col., 1992, Chang y col., 1992, Lundstrom y col., 1995, Dougherty y col., 2003, Iglesias y col., 2006, Camacho y col., 2008). Se han hecho varias propuestas para modificar el algoritmo DMC y mejorar su desempeño con procesos no lineales. Una de ellas la desarrollada en 2006 por Iglesias (Iglesias, 2006), que propone la estructura del DMC paramétrico (PDMC) que es una modificación del algoritmo DMC convencional. Esta estructura fue diseñada para incluir parámetros variables del modelo del proceso, ajustables a los cambios del sistema, en aras de mantener actualizado el modelo y garantizar el desempeño adecuado del controlador.

Hay muchas formas para describir el algoritmo DMC convencional, usaremos aquí la propuesta por Sanjuan (Sanjuan 1999) que expresa en forma matricial la ley de control propuesta por Cutler y Ramaker (Cutler y col., 1979) como se muestra en la ecuación (1), donde A es la matriz dinámica del proceso, ΔM es el vector de salida del controlador, λ es el factor de supresión, y I es la matriz identidad.

$$\Delta M = (A^T A + \lambda^2 I)^{-1} A^T E \quad (1)$$

La parametrización del DMC con base en la ecuación (1) se realiza con la finalidad de aislar los efectos individuales de cada parámetro dinámico característico del proceso: ganancia K_p , constante de tiempo τ y tiempo muerto t_0 ; se incluye además el factor de supresión λ que es un parámetro de sintonización del controlador, tal como se expresa de forma general en la ecuación (2), que será desarrollada posteriormente.

$$\Delta M = f(K_p, \tau, t_0, \lambda) E \quad (2)$$

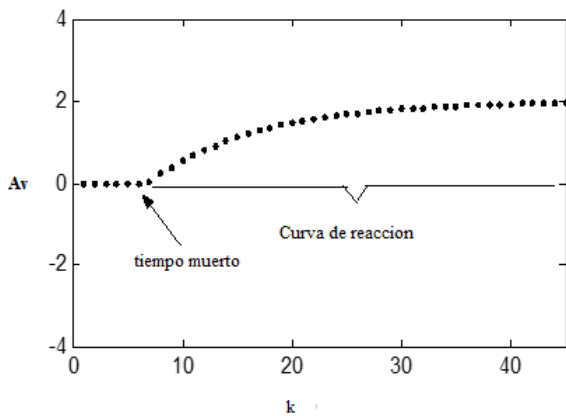


Figura 1. Información contenida en el vector de respuesta A_v

La ventaja de aislar el cambio individual de cada parámetro del proceso, es que el PDMC se ha programado para reconocerlo y actualizar el modelo en línea, sin la necesidad de

parar el lazo de control para realizar nuevas identificaciones. Esta identificación en línea permite además ajustar inmediatamente el factor de supresión para mantener la suavidad en la respuesta, y seguir aprovechando las ventajas del DMC, tales como su capacidad para manejar casos multivariantes y/o procesos con elevados tiempos de retardo (Iglesias y col., 2016). El PDMC requiere de una prueba inicial de identificación a lazo abierto, que consiste en enviar un cambio escalón a la señal que alimenta al elemento final de control; con el objetivo de almacenar la respuesta del proceso en un vector, A_v , que contiene toda la información dinámica: t_0 , τ y la ganancia en estado estacionario K_p . La Figura 1 muestra una curva de reacción típica de la prueba de identificación. La ley de control del PDMC es la mostrada en la ecuación (3), donde el factor $1/K_p$ permite actualizar en el modelo los cambios en la ganancia del proceso, la matriz de ceros $Z_{CH \times n}$ permite introducir la compensación por cambios en el tiempo muerto con base en el horizonte de control CH y n , que representa el número de periodos de muestreo, T_s , equivalentes al tiempo muerto $t_0 = nT_s$. Si el tiempo muerto cambia solo es necesario modificar el número de columnas (n) de la matriz Z . E es el vector error.

$$\Delta M = \frac{1}{K_p} \left[Z_{CH \times n} : (D_{adj}^T D_{adj} + \lambda_p^2 I)^{-1} D_{adj}^T \right]_{CH \times PH} E \quad (3)$$

La matriz D_{adj} permite actualizar en el modelo los cambios en la constante de tiempo t_0 a partir de una relación como la mostrada en la ecuación (4). Cada término de la matriz D es multiplicado por un escalar, que físicamente representa la relación entre la dinámica de primer orden del proceso original con τ_{orig} y el proceso con la nueva constante de tiempo τ_{nuevo} . K_i representa el primer término distinto de la unidad de la fila i -ésima de la matriz D . La matriz D se construye repitiendo los elementos no nulos del vector de respuesta A_v hasta obtener una matriz triangular inferior de tamaño D $(PH-n) \times CH$, donde PH es el horizonte de predicción o número de periodos de muestreo usados para predecir la respuesta del controlador en el futuro.

$$D_{adj} = D \begin{pmatrix} 1 - \exp\left(\frac{-k_i T_s}{\tau_{nuevo}}\right) \\ 1 - \exp\left(\frac{-k_i T_s}{\tau_{orig}}\right) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Para finalizar, el factor de supresión, es un parámetro de sintonización cuyo valor óptimo puede ser calculado usando los parámetros dinámicos del proceso tal como en la ecuación (5) definida por Iglesias et al. (Iglesias 2006):

$$\lambda = 1.631 K_p \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{0.4094} \quad (5)$$

La explicación detallada del desarrollo de la ley de control del PDMC puede hallarse en Iglesias et al. (Iglesias y col., 2016).

3 Controlador por modos deslizantes (SMC)

El Control de Modo Deslizante (SMC) es una técnica derivada del Control por Estructura Variable VariableStructure Control, VSC, propuesto originalmente por Utkin (Utkin 1992). Un controlador SMC es robusto y sencillo, y particularmente atractivo debido a su capacidad de controlar sistemas no lineales, que hacen fallar a las técnicas tradicionales (Camacho y col., Iglesias y col., 2007). El diseño basado en SMC consiste en definir una superficie $s(t)$ a lo largo de la cual el sistema pueda deslizarse hacia su valor final deseado. $S(t)$, representa la dinámica deseada del sistema a lazo cerrado. Esta superficie puede representarse como en la ecuación (6), donde $R(t)$ es la señal de referencia, $X(t)$ es la salida del proceso, $e(t)$ es el error, n es el orden del proceso y α es un parámetro de sintonización (Camacho y col., 2000). El objetivo de control es asegurar que la variable controlada sea igual a la referencia en todo momento, es decir que el error y sus derivadas sean iguales a cero.

$$s(t) = f(R(t), X(t), e(t), \alpha, n) \quad (6)$$

La ley del control de SMC, $U(t)$ mostrada en la ecuación (7), consiste en dos porciones aditivas: una parte continua, $U_C(t)$, responsable de mantener al sistema sobre la superficie deslizante (modo deslizante), y una parte discontinua, $U_D(t)$, que lleva al sistema desde su condición inicial hacia la superficie deslizante (modo de acercamiento). La Figura 2 representa esquemáticamente como funciona un controlador SMC.

$$U(t) = U_C(t) + U_D(t) \quad (7)$$

Una vez que el valor de referencia se alcanza, $s(t)$ toma un valor constante y el problema de seguimiento de la referencia se reduce a satisfacer la condición deslizante (8):

$$\frac{ds(t)}{dt} = 0 \quad (8)$$

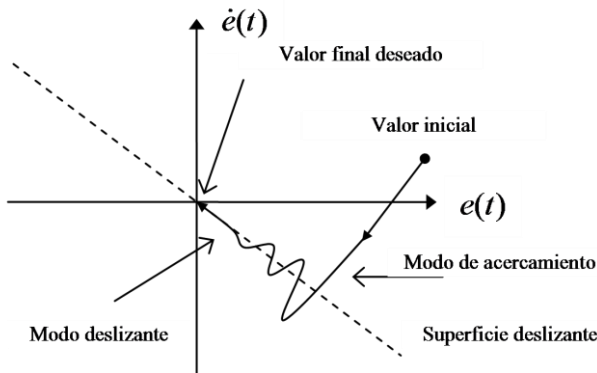


Figura 2. Interpretación Gráfica del SMC

Camacho y Smith (Camacho y col., 2000) desarrollaron un método sencillo y práctico para diseñar un SMC basado en un modelo de primer orden más tiempo muerto (POMTM) del proceso real. La ecuación (9a) refleja la ley de control $U(t)$, y la ecuación (9b) la expresión de la superficie deslizante $s(t)$.

$$U(t) = \frac{t_0\tau}{K_p} \left(\frac{X(t)}{t_0\tau} \right) + \alpha_0 e(t) + K_D \frac{s(t)}{|s(t)| + \delta} \quad (9a)$$

$$s(t) = \text{sgn}(K_p) \left(-\frac{dX(t)}{dt} + \alpha_1 e(t) + \alpha_0 \int_0^t e(t) dt \right) \quad (9b)$$

Donde $U(t)$ es la salida del controlador [CO], $X(t)$ es la variable controlada en las unidades de la variable controlada, α_0 es un parámetro de sintonización de la parte continua del controlador en $[tiempo]^{-2}$, $e(t)$ es la señal de error, K_D es la ganancia del controlador en fracciones de la salida del controlador CO, $s(t)$ es la superficie deslizante, δ es un parámetro de sintonización cuyo propósito es la reducción del fenómeno conocido como chattering del controlador y viene dado en fracciones de la salida del transmisor (Transmisor Output, TO)/ tiempo y α_1 es otro parámetro de ajuste de la parte continua del controlador en $[tiempo]^{-1}$. El término $\text{sgn}(K_p)$ es usado para definir la acción del controlador, acción directa o acción reversa según sea el caso. Para ajustar la parte continua y la superficie deslizante del SMC se usan las ecuaciones (10a) y (10b); y para la parte discontinua se usan las ecuaciones (10c) y (10d) (Camacho y col., 2000)

$$\alpha_1 = \frac{t_0 + \tau}{t_0\tau} [=] [tiempo]^{-1} \quad (10a)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{4} \frac{t_0 + \tau}{t_0\tau} [=] [tiempo]^{-2} \quad (10b)$$

$$K_D = \frac{0.51}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)^{0.76} [=] [\text{fraccion}] \quad (10c)$$

$$\delta = 0.68 + 0.12|K|K_D\alpha_1 [=] [\text{fraccion/tiempo}] \quad (10d)$$

Los parámetros de sintonización están basados en las variables del proceso (K_p , τ , t_0), obtenidos a través del método de identificación a lazo abierto o curva de reacción.

4 Módulo Supervisor basado en SMC

Desde la formulación del PDMC, Iglesias et al. (Iglesias y col., 2016) incluyeron un módulo supervisor basado en lógica difusa, que es capaz de detectar los cambios en los parámetros dinámicos, e incorporarlos en línea al modelo del proceso, sin detener el lazo de control.

En este estudio, se propone generar un módulo supervisor con el mismo objetivo final pero usando la técnica de modo deslizante para identificar los cambios en la dinámica del

proceso. Se seleccionó como modelo un proceso de primer orden más tiempo muerto (POMTM), en un experimento factorial completo con los parámetros característicos, K_p, τ y t_0/τ , y sus cambios $\Delta K_p, \Delta \tau, \Delta(t_0/\tau)$ como factores a estudiar. Para estimar la influencia de cada factor sobre la superficie deslizando se utilizaron tres niveles para un total de $3^6 = 729$ experimentos. Las variables y sus niveles se muestran en la Tabla 1. Para cada experimento se aplicó un cambio de consigna de $+10\%TO$ como función de forzamiento.

Tabla 1: Valores de los parámetros dinámicos y sus variaciones

K_p	τ	(t_0/τ)	$\Delta K_p(\%)$	$\Delta \tau(\%)$	$\Delta(t_0/\tau)(\%)$
0.5	5	0.5	10	10	10
1.5	10	1.0	30	30	30
2.5	15	1.5	50	50	50

De cada experimento se obtuvo la superficie deslizando correspondiente, que se caracterizó según su tiempo para alcanzar el mínimo valor, tiempo para alcanzar el máximo valor, el pico mínimo, el pico máximo y el periodo. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar cuál de los factores ejerce una influencia significativa sobre cada parámetro característico de la superficie deslizando. Todos los análisis se realizaron con un nivel de confianza del 95%. Solo el pico mínimo (Y_1), el tiempo para alcanzarlo o tiempo mínimo (Y_2) y el periodo (Y_3) mostraron relaciones significativas con los factores estudiados. Usando un análisis de regresión se obtuvieron las expresiones que permiten determinar el pico mínimo (11), el tiempo mínimo (12) y el periodo (13) de la superficie deslizando como función de los parámetros dinámicos del proceso y sus variaciones:

$$Y_1 = -0.12361 - 0.05242x_1 - 0.062124x_3 - 0.030563x_4 - 0.005084x_5 - 0.09394x_6 - 0.03509x_1x_3 - 0.07755x_1x_4 - 0.0001605x_1x_5 - 0.011387x_1x_6 - 0.010125x_3x_4 - 0.0011869x_3x_5 - 0.08782x_3x_6 - 0.023212x_4x_5 - 0.027632x_4x_6 - 0.007607x_5x_6 - 0.02693x_1^2 - 0.007128x_3^2 - 0.03492x_4^2 - 0.0006282x_5^2 - 0.02166x_6^2 \quad (11)$$

$$Y_2 = 54.127 - 12.104x_1 - 18.51x_3 - 1.4772x_4 - 0.6419x_5 - 8.4622x_6 - 1.783x_1x_3 - 22.511x_1x_4 - 0.07965x_1x_5 - 4.3791x_1x_6 - 10.11x_3x_4 - 0.85161x_3x_5 - 16.291x_3x_6 - 2.0966x_4x_5 - 3.2492x_4x_6 - 0.6627x_5x_6 - 0.32554x_1^2 - 11.749x_3^2 - 27.163x_4^2 - 0.3645x_5^2 - 5.8308x_6^2 \quad (12)$$

$$Y_3 = 7.800 - 1.735x_2 - 8.155x_3 - 22.957x_4 - 3.404x_5 - 22.598x_6 - 1.811x_2x_3 - 1.253x_2x_4 - 0.2136x_2x_5 - 3.656x_2x_6 - 13.709x_3x_4 - 0.4895x_3x_5 - 38.242x_3x_6 - 1.035x_4x_5 - 8.907x_4x_6 - 0.0840x_5x_6 - 0.1150x_2^2 - 8.539x_3^2 - 15.800x_4^2 - 0.647x_5^2 - 35.765x_6^2 \quad (13)$$

Donde:

- x_1 es la ganancia del proceso, K_p
- x_2 es la constante de tiempo del proceso, τ
- x_3 es el tiempo muerto dividido por la constante de tiempo del proceso, (t_0/τ)
- x_4 es el cambio en la ganancia del proceso, ΔK_p
- x_5 es el cambio de la constante de tiempo del proceso, $\Delta \tau$
- x_6 es el cambio en el tiempo muerto dividido por la constante de tiempo del proceso, $\Delta(t_0/\tau)$

Las Ecuaciones (11), (12) y (13) pueden ser usadas para calcular los cambios en la dinámica del proceso, una vez que se conoce como cambia la superficie deslizando. Este conjunto de ecuaciones constituye el módulo supervisor que complementa al PDMC. A nivel industrial cada vez que se evidencien cambios en la dinámica del proceso, se puede realizar en línea una prueba de identificación, que consiste en implementar un cambio en el punto de operación como función de forzamiento para registrar la respuesta de la superficie deslizando, de la que se extraerán los valores para el pico mínimo y su tiempo, y el periodo. Estos tres valores se alimentan a las (11), (12) y (13), conjuntamente con los valores de $K_p, \tau, t_0/\tau$ de la identificación original del PDMC. La resolución del sistema no lineal permite estimar las variaciones $\Delta K_p, \Delta \tau, \Delta(t_0/\tau)$ sufridas por el proceso. Estos valores serán usados en las ecuaciones (4), (3) y (5) para actualizar el controlador, asegurando su desempeño eficiente y estable. Una descripción detallada del diseño del experimento factorial completo, los resultados de la superficie deslizando, análisis de varianza y estudio de la bondad de ajuste de las regresiones logradas puede hallarse en la literatura (Valverde 2008). A partir de aquí el PDMC y su módulo supervisor basado en información proveniente de la superficie deslizando serán referidos como PDMC+SMC

5 Descripción del modelo industrial de prueba

Para evaluar la bondad del desempeño del PDMC junto al módulo supervisor propuesto, se realizó un análisis comparativo contra un SMC y un DMC estándar. Estas tres estrategias fueron implementadas en un lazo de control de temperatura en un tanque de mezclado de agua fría y agua caliente.

Este proceso se seleccionó por ser común en la industria, y presentar fuertes no linealidades en su dinámica y tiempo muerto variable. El sistema está formado por un tanque de mezclado tal como se muestra en la Figura 3. El tanque recibe un flujo caliente, $W_1(t)$, y un flujo frío $W_2(t)$. La tempe-

ratura de salida es medida en un punto a 125ft aguas abajo. El proceso se encarga de mantener la temperatura de salida del tanque de mezclado a cierto valor de referencia, manipulando el flujo de agua fría a través de una válvula de control. Se asume que las dos corrientes introducidas al tanque están bien mezcladas, el volumen y la densidad del líquido dentro del tanque son constantes. El tanque y la tubería están bien aislados produciendo un tiempo muerto variable a la hora de medir la temperatura de salida del tanque. La temperatura del transmisor esta calibrada para un rango de 100°F a 200°F. En Camacho y Smith (2000) se puede observar con detalle el modelo y los parámetros de diseño de este proceso (Camacho y col., 2000).

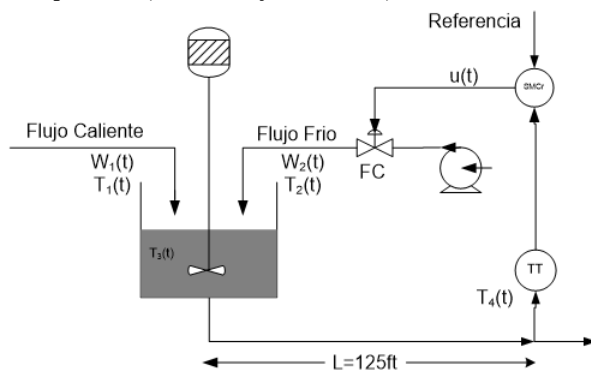


Figura 3: Sistema de mezclado con lazo de control de temperatura

Para la implementación de los tres controladores (PDMC+SMC, DMC y SMC) se realizó una identificación inicial del proceso usando como función de forzamiento una variación de 10% en la señal de la válvula de control. La respuesta del sistema permitió determinar los parámetros dinámicos que se muestran en la tabla 2 y ajustar a los controladores PDMC y DMC estándar. Así mismo estos valores fueron alimentados a las ecuaciones (10a)-(10d) para el ajuste inicial del controlador SMC propuesto por Camacho y col., 2000, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 3.

6 Evaluación del módulo supervisor

La prueba diseñada para evaluar la efectividad del módulo supervisor en su tarea de mantener actualizada la ley de control del PDMC, consistió en alimentar al lazo de control una serie de cambios de puntos de operación ($cset(t)$) intercalados con perturbaciones del 5% en el flujo de agua caliente. La respuesta del PDMC+SMC fue comparada con un SMC y un DMC estándar.

Tabla 2: Parámetros del modelo POMTM

Parámetro	Valor
K_p	-0.78503 Fracción CO/Fracción TO
t_0	3.5663 min
τ	2.0906 min

Tabla 3: Parámetros del controlador SMC

Parámetro	Valor
K_D	0.43291 Fracción CO
α_0	0.14392 min^{-2}
α_1	0.75873 min^{-1}
δ	0.71094 Fracción TO/min

Las figuras 5 y 6 muestran el cambio en la salida del sensor transmisor, $c(t)$ [%TO], cuando ocurre la secuencia de cambios con las estrategias de control DMC estándar y la PDMC+SMC, respectivamente. La Figura 7 muestra simultáneamente ambas estrategias para efectos de comparación. En la figura 5 y la figura 7 se evidencian a que a medida que los cambios afectan al proceso, el DMC estándar pierde estabilidad, alejándose cada vez más del punto de operación, debido a que su ley de control (establecida con los parámetros dinámicos de la identificación original), pierde validez. En la figura 4 se muestra que la señal de salida del controlador DMC estándar es tan oscilatoria que puede romper cualquier elemento final de control conectado al lazo.

En contraste con el DMC, en la figura 6 y la figura 7 observamos que como el PDMC+SMC es capaz de actualizar su ley de control, ajustándose a los nuevos parámetros dinámicos del proceso, sigue con una señal estable, los cambios en el valor de referencia, rechazando además las perturbaciones impuestas.

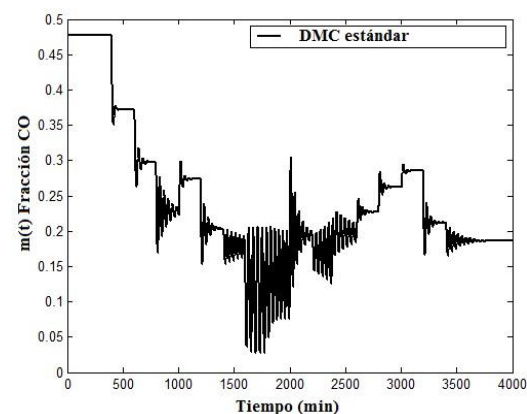


Figura 4: Salida del controlador DMC o señal a la válvula

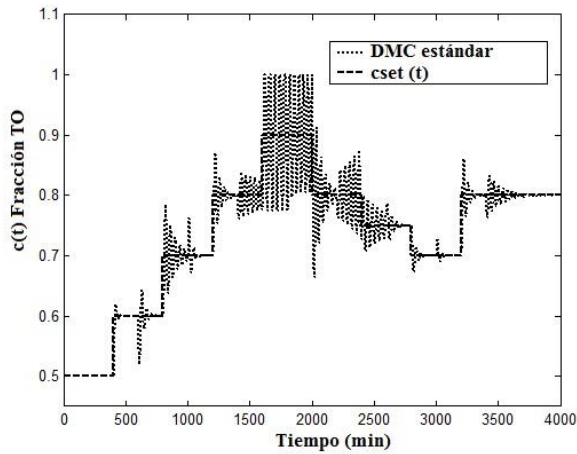


Figura 5: Comportamiento del lazo de control con el DMC estándar

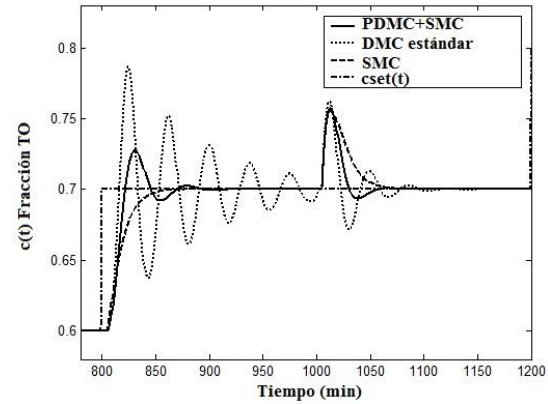


Figura 8: Detalle de la Figura 6 para un tiempo entre 700 min y 1200 min

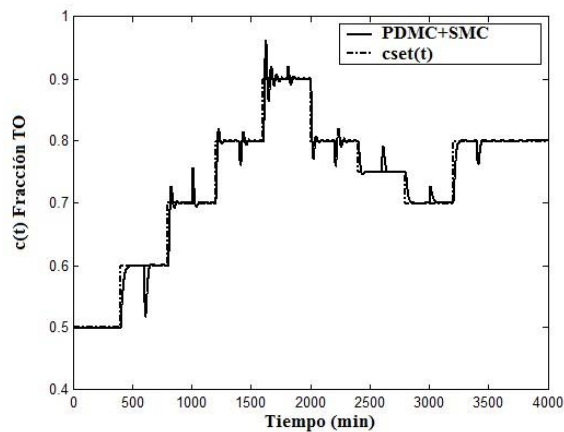


Figura 6: Comportamiento del lazo de control con el PDMC+SMC

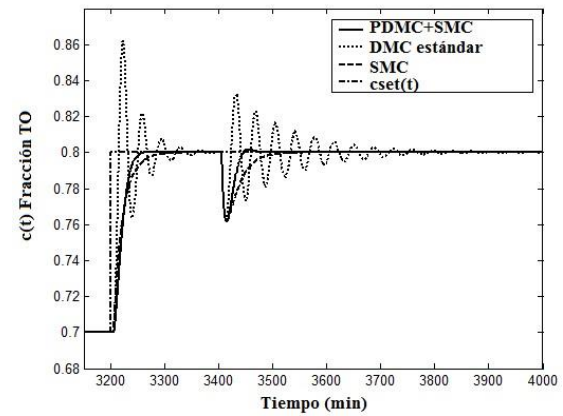


Figura 9: Detalle de la Figura 6 para un tiempo entre 3100 min y 4000 min

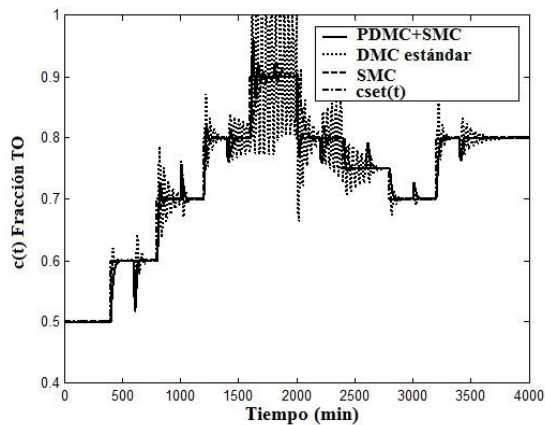


Figura 7: Comparación entre las salidas de los lazos de control PDMC+SMC, DMC estándar y SMC

Tabla 4: Índices de funcionamiento para los controladores SMC, DMC normal y PDMC+SMC

Índice	SMC	DMC	DMC+SMC
IAE	31.8981	75.1856	23.3072
ICE	1.5875	4.8498	1.1888

La figura 7 muestra adicionalmente la respuesta del SMC, y en ella es difícil encontrar diferencias de desempeño en comparación con el PDMC+SMC. Ambos parecerían ser estables y eficientes en el control de los cambios y las perturbaciones impuestas. Pero si observamos la figura 8 y la figura 9, que muestran acercamientos para los intervalos de tiempo entre 700min–1200min, y 3100min–4000min, notamos que la respuesta del sistema con el SMC es mucho más lenta que la del PDMC+SMC, necesitando más tiempo para alcanzar el valor de referencia. Para cuantificar la bondad del desempeño de las estrategias de control se usaron la integral del valor absoluto del error, (IAE), y la integral del

cuadrado del error, (*ICE*). Sus valores se muestran en la tabla 4, y permiten verificar lo establecido anteriormente. El DMC estándar presenta los máximos valores de *IAE* y *ICE*, y tiene por tanto el desempeño menos eficiente. Los mínimos valores se corresponden con el PDMC+SMC, quedando disminuye en un 27% el *IAE* del SMC, y en un 69% el *IAE* del DMC. La reducción del *ICE* para los mismos casos es de 25% y del 75%, respectivamente.

7 Conclusiones

Las simulaciones mostraron en todos los casos, mejoras en los índices de funcionamiento del PDMC+SMC en relación al DMC estándar y al SMC. El controlador PDMC+SMC mostro ser más robusto y con mejor desempeño que los esquemas originales para el caso de sistemas con retardo elevado y variable. El modulo supervisor, construido a partir de la superficie deslizante, mostro ser efectivo en la identificación de los cambios en los parámetros dinámicos del proceso, permitiendo una rápida incorporación de esta información a la ley de control, lo que redundo en una adaptación rápida y estable del PDMC a las fuertes no linealidades del proceso estudiado.

Agradecimientos

Oscar Camacho agradece al Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia Tecnología e Innovación de la Republica del Ecuador, por su patrocinio para la realización de este trabajo.

Referencias

- Camacho O, Iglesias E, Valverde L, Rivas F, 2008, An approach to enhance dynamic matrix control performance, *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 2, no. 1, pp. 81–88.
- Camacho O, Smith C, 2000, Sliding mode control: an approach to regulate nonlinear chemical processes, *ISA Transactions*, Vol. 39, no. 2, pp. 205–218
- Chang CM, Wang SJ, Yu SW, 1992, Improved DMC design for nonlinear process control, *AIChE Journal*, Vol. 38, no. 4, pp. 607–610
- Cutler C, Ramaker B, 1979, Dynamic matrix control- a computer control algorithm, en *Proceedings of the 86 th National Meeting of the American Institute of Chemical Engineering*, pp. WP5–B.
- Dougherty D, Cooper DJ, 2003, Tuning guidelines of a dynamic matrix controller for integrating (non-self-regulating) processes, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 42, no. 8, pp. 1739–1752.
- Georgiou A, Georgakis C, Luyben WL, 1988, Nonlinear dynamic matrix control for high-purity distillation columns, *AIChE Journal*, Vol. 34, no. 8, pp. 1287–1298.
- González Sorribes A, 2011, *Sistemas Dinámicos con Retardos Temporales: Controladores Digitales basados en predictor para sistemas con retardos variables en el tiempo*, Tesis Doctoral, Universitat Politécnica de Valencia, Valencia, España
- Iglesias E, 2006, *Using Fuzzy Logic to Enhance Control Performance of Sliding Mode Control and Dynamic Matrix Control*, Doctoral Dissertation, University of South Florida, Tampa, FL, USA.
- Iglesias E, Camacho O, Sanjuan M, Smith C, Calderon S, Andrés R, 2016, A parametric dynamic matrix controller approach for nonlinear chemical processes, *WSEAS Transactions on Systems and Control*, Volume 11, pp. 397–408
- Iglesias E, García Y, Sanjuan M, Camacho O, Smith C, 2007, Fuzzy surfaced-based sliding mode control, *International Society of American (ISA) Transactions*, Vol. 43, pp. 73–83.
- Iglesias E, Sanjuan M, Smith C, 2006, Tuning equation-for dynamic matrix control in siso loops, *Revista Ingeniería y Desarrollo*, Vol. 19, no. 1-2, pp. 88–100.
- Islam Khan F, Shoukat Choudhury M, 2014, Comparative study of different supervisory control structures, en *Proceedings of the 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP 2014)*, pp. 455–460.
- Lundstrom P, Lee J, Morari M, Skogestad S, 1995, Limitations of dynamic matrix control, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 19, No. 4, pp. 409–421.
- Normey-Rico JE, Camacho O, 2007, *Control of Deadtime Processes*, *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*, Springer-Verlag London.
- Peterson T, Hernandez E, Arkun Y, Schork F, 1992, A nonlinear dmc algorithm and its application to a semibatch polymerization reactor, *Chemical Engineering Science*, Vol. 47, no. 4, pp. 737–753.
- Sanjuan M, 1999, Control dinámico matricial: Fundamentos y aplicaciones, *Revista Ingeniería y Desarrollo*, Vol. 1, no. 3-4, pp. 85–92.
- Smith J, 1957, Close control of loops with dead time, *Chemical Engineering Progress*, Vol. 53, no. 5, pp. 217–219.
- Utkin VI, 1992, *Sliding Modes in Control and Optimization*, 1ª ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Valverde LC, 2008, *Estrategia De Control Robusto Por Modos Deslizantes Para Mejorar El Comportamiento Del Controlador Predictivo PDMCR*, Tesis de Maestría, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Luis Carlos Valverde Dugarte:** *Graduado en Ingeniería de Sistemas (2004, Universidad de Los Andes, ULA, Venezuela) e Ingeniería Química (, ULA, Vzla) MSc en Automatización y Control (2008, ULA, Vzla). Correo electrónico: lvalver@yahoo.com*
- Oscar Eduardo Camacho Quintero:** *Profesor Titular de la Escuela de Eléctrica de la Universidad de Los Andes (ULA), Venezuela. Graduado como Ingeniero Electricista*

(1984, ULA, Vzla), MSc en Ingeniería de Control (1992, ULA, Vzla), ME en Ingeniería Química (1994, University of South Florida, EE.UU.), PhD en Ingeniería Química (1996, USF, EE.UU.). Editor Asociado de la Revista ISA Transactions. Actualmente es Profesor Titular de la Escuela Politécnica Nacional, Quito. Ecuador.

Edinzo Jesús Iglesias Sánchez: Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes (ULA, Vzla). Graduado en Ingeniería Química (1993, ULA, Vzla), MSc en Ingeniería Química (1998, ULA, Vzla), PhD en Ingeniería Química (2006, USF, EE.UU.). Correo electrónico: iedinzo@ula.ve

Silvia Margarita Calderón: Profesora Titular de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes (ULA, Vzla). Graduado en Ingeniería Química (1998, ULA, Vzla), MSc en Matemática Aplicada a la Ingeniería (2002, ULA, Vzla), PhD en Ingeniería Química (2006, USF, EE.UU.). Correo electrónico: silvimar@ula.ve

Andrés Rosales: Profesor Principal del Departamento de Control y Automatización de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito, Ecuador. Graduado en Electrónica e Ingeniería de Control (2004, EPN), Doctorado en Ingeniería de Sistemas de Control (2009, Universidad Nacional de San Juan, UNSJ, Argentina). Correo electrónico: andres.rosales@epn.edu.ec

Capítulo 43

La computación científica en la enseñanza de la ingeniería química

Calderón, Silvia*; Iglesias, Edinzo

¹Laboratorio para la Caracterización Fisicoquímica y Modelado de la Atmósfera (FIQMA), Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 5101

*silvimar@ula.ve

Resumen

El incremento en la capacidad y velocidad de cómputo, así como del número de herramientas computacionales, especialmente como software libre; obligan a un cambio radical en la enseñanza en Ingeniería Química. En el siglo XXI se requiere de profesionales altamente capacitados en el modelado y la simulación de los procesos, pues ya no se trata de encontrar una solución para el problema, sino de hallar la solución óptima en un ambiente de múltiples escenarios. A lo largo de dos décadas, hemos tratado de ayudar a nuestros estudiantes a crear y fortalecer sus habilidades de cálculo, para evitar que la falta de pericia en el manejo de herramientas matemáticas y computacionales, les impidan alcanzar otras competencias profesionales. Este trabajo pretende resumir y dejar constancia de este esfuerzo docente, con sus logros y aspectos a mejorar, para incentivar a las nuevas generaciones a continuar en este camino, el de lograr que el estudiante comprenda la dupla fenómeno/herramienta matemática en concordancia con la realidad del mundo profesional. Cada propuesta docente inicia con el estudio del fenómeno y la formulación de su modelo descriptivo, continúa con la construcción, implementación y optimización de los códigos, y finaliza con la presentación de la solución óptima. Se muestran dos duplas: los fenómenos de transferencia de masa junto a los operadores derivativos; y el equilibrio de fases en sistemas en conjunto con los sistemas de ecuaciones no lineales.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

La Ingeniería nace para ofrecer soluciones prácticas a los problemas de la sociedad, por lo que ha debido adaptarse para responder a sus necesidades cambiantes a lo largo de la historia: urbanizar y suplir de servicios básicos a las ciudades estado de las civilizaciones antiguas, erigir los grandes sitios de culto religioso en la edad media, retomar la búsqueda del conocimiento como vía de progreso social durante el Renacimiento, industrializar la manufactura de todos los bienes y servicios en el siglo XIX, inventar tecnologías para la producción y aprovechamiento máximo de la energía en combustibles fósiles en el siglo XX; diversificarse para realizar avances en la medicina, aeronáutica, astronomía, geología, ambiente, etc. durante el siglo XXI.

Este requerimiento de adaptabilidad que la sociedad impone a esta profesión, hace que la formación universitaria en Ingeniería sea difícil de realizar, sin mantener un canal abierto para la interacción universidad-industria-sociedad (Lamancusa y col., 1997). Se requiere de un balance entre la teoría y la práctica, entre el aprendizaje de las técnicas industriales, la investigación en laboratorios y los fundamentos científicos de los fenómenos; entre las prácticas docentes tradicionales y las que incorporan nuevas tecnologías.

Aunque la clase magistral ha permanecido por siglos, como la vía usada por excelencia para transmitir el conocimiento, debido a que permite al experto entregar el saber a sus aprendices a través de su experiencia de vida; hoy en día su efectividad se ve limitada. En auditorios con grandes matrículas estudiantiles, es difícil acompañar la entrega verbal de información, con el aprendizaje por experimentación directa, cuya ventaja principal es la alimentación de información por los múltiples canales de recepción (visual, táctil, auditivo, etc.) (Lamancusa y col., 1997).

En las universidades públicas venezolanas, la relación numérica estudiante por profesor es elevada, y está en contraposición con la capacidad y número de espacios para la enseñanza práctica (laboratorios, talleres, etc.); es por ello que la clase magistral sigue siendo la técnica docente más usada. Sin embargo a pesar de sus fallas y detractores, la combinación de la clase magistral con las nuevas tecnologías de la información y comunicación (TICs), y las herramientas computacionales, resulta perfecta. A lo largo de décadas de experiencia en la docencia universitaria, hemos observado que la pericia en el manejo de un lenguaje de programación y la implementación de rutinas de cálculo, le imprimen efectividad y dinamismo al proceso enseñanza-aprendizaje. La comprensión de un fenómeno se logra moviéndose a través de las relaciones entre las variables, o los modelos de descripción de sus comportamientos, en una progresión de complejidad que va desde el concepto básico, a su aplicación a nivel industrial. Con el uso de las herramientas matemáticas y el computador esto puede lograrse con un mínimo costo en tiempo de cálculo y esfuerzo; y con toda la maravilla de la representación gráfica.

Este enfoque matemático-computacional para el estudio de

los fenómenos, es lo que se denomina computación científica, hoy definida como la ciencia encargada de formular, resolver e implementar modelos matemáticos para el desarrollo, control y optimización de procesos y/o productos (Keil y col., 1996). Desde hace dos décadas, ya se vislumbraba la necesidad de revitalizar el diseño curricular en Ingeniería, incorporando de lleno, la computación científica en experiencias de aula enfocadas al estudio de casos de importancia industrial (Lamancusa y col., 1997). Sin embargo, las habilidades computacionales no eran un objetivo prioritario en la formación académica en Ingeniería. Aunque, son competencias profesionales esenciales para el ingeniero del siglo XXI, siguen siendo una debilidad en los diseños curriculares actuales. En muchos planes de estudio actuales, las herramientas computacionales se incluyen como cursos aislados en computación, programación digital, etc., y se hace poco o ningún énfasis con las experiencias ingenieriles que motivan al estudiante, además no se establece firmemente la continuidad en su implementación en las siguientes etapas de formación. Si el estudiante debe demostrar manejo fluido de estas herramientas una sola vez a lo largo de su carrera, y además en una única materia; es difícil que logre desarrollarse independientemente en este campo. De hecho, existen estudios socio-académicos donde estudiantes de Ingeniería señalan que sus habilidades computacionales, junto a la motivación al éxito y la comprensión de los tópicos de estudio, son los factores que tienen mayor influencia sobre la confianza en sí mismos y su capacidad para alcanzar un buen rendimiento académico. De manera específica, relacionan esta autoconfianza con su habilidad para usar una o más herramientas, tales como MatLab, Excel o UNIX, su habilidad para programar y usar una computadora en general (Hutchison y col., 2006).

A lo largo de dos décadas, hemos tratado de ayudar a nuestros estudiantes a crear y fortalecer sus habilidades de cálculo, para evitar que la falta de pericia en el manejo de herramientas matemáticas y computacionales, les impidan alcanzar otras competencias profesionales. Este trabajo pretende resumir y dejar constancia de este esfuerzo. Mostramos una propuesta docente cuyo objetivo fundamental es el de usar la computación científica para mejorar el proceso de enseñanza en Ingeniería Química, promoviendo el desarrollo de las habilidades computacionales y de análisis requeridas para alcanzar el éxito en el mundo profesional actual. Pretendemos destacar la necesidad de que las nuevas generaciones de docentes, le den la importancia requerida a la matemática como herramienta para analizar y solucionar problemas, y a la computación como única vía para hallar aquella solución que no sólo maximiza la rentabilidad, sino que optimiza el uso del tiempo y los recursos, y minimiza el impacto ambiental. Solo así podremos crear el ingeniero del futuro, uno que aún estando comprometido con su profesión, es fiel a su deber de preservar el planeta para las generaciones futuras.

2 Metodología

Debido a que el objetivo es mostrar un esquema novedoso para la enseñanza de la Ingeniería Química usando la computación científica, se tomaron dos de los tópicos menos tratados en los libros textos, y que por tanto, han sido de los más exitosos en las experiencias de aula realizadas por los autores. Cada tópico de estudio es mostrado siguiendo una secuencia que inicia con la explicación del concepto matemático (en este caso los operadores derivativos y las ecuaciones no lineales), prosigue con la aplicación del concepto a un fenómeno de interés en la Ingeniería Química, y continúa con la presentación del modelo que unifica el concepto matemático al fenómeno. Se procede con la construcción y explicación del código para resolver el modelo, y se culmina con la presentación de la solución. Todos los códigos para la resolución del modelo están escritos en MatLab (MatLab 2012), y se trabaja actualmente en la conversión al software libre.

3 Resultados

3.1 Los fenómenos de transferencia de masa y los operadores diferenciales

El estudio de los operadores diferenciales es fundamental para la comprensión de los balances de masa, energía y cantidad de movimiento, con los que se inicia cualquier curso sobre Fenómenos de Transporte. Para facilitar su comprensión, este tópico es incluido adicionalmente en los cursos preparatorios de Matemáticas, buscando también que el estudiante de Ingeniería se familiarice con la simbología, antes de usarla en sus cursos de Operaciones Unitarias. Desde la implementación de la propuesta docente que se muestra en este estudio, hemos notado que los estudiantes comprenden con mayor rapidez el uso de los operadores derivativos, cuando los aplicamos a casos de importancia ingenieril, como el derrame accidental de químicos en plantas industriales.

Imaginemos que se tiene un tanque de almacenamiento de un gas de elevada toxicidad, como el ácido cianhídrico (HCN), un agente químico precursor para la producción de metacrilato de metilo y adiponitrilo, monómeros fundamentales en la fabricación del nylon 66 y el polimetilmetacrilato, entre otras aplicaciones (Austin 1997). Se puede almacenar en estado líquido, pero ebulle a 26°C a presión de 1atm (Linstrom y col., 2005). Imaginemos ahora que el tanque explota liberando su contenido al ambiente circundante instantáneamente. Como el (HCN) gaseoso es menos pesado que el aire, asumimos que se dispersa dentro de un cubo al que no entra nada ni sale nada por convección, donde no hay reacción, únicamente difusión. El cubo se mueve a la velocidad local de la atmósfera, tal como se esquematiza en la Figura 1. A esto se le llama modelo Lagrangiano para el mezclado turbulento.

En un espacio cartesiano tridimensional, imaginamos que existe un pequeño cubo dentro el interior del cubo de aire donde ocurrió la explosión. Allí el gas difunde de mayor a menor concentración en proporción directa a su coeficiente de dispersión ($\mathbf{K}$); así como lo hace la energía en forma de calor entre dos puntos de distinta temperatura. La concentración del gas en este espacio representa un Campo Escalar, puesto que a todo punto P del espacio $\mathbb{R}^n$ le corresponde un escalar $c(x,y,z,t)$. En este caso, la dependencia con el tiempo nos habla de una variable dinámica. En Ingeniería Química podemos usar los campos escalares para describir los perfiles de temperatura, presión, concentración dentro de intercambiadores de calor, reactores, columnas de destilación, tanques de mezclado, entre otros.

Dado que la transferencia tanto de masa, energía o cantidad de movimiento dentro de un sistema físico, es producto de la existencia de una variación en el campo escalar o vectorial, de la función potencial correspondiente (potencial químico o concentración, temperatura, presión); es necesario conocer cuales son los operadores matemáticos que nos permiten estimarlas. Estos operadores suelen agruparse en lo que se conoce como vectores derivativos u operadores diferenciales vectoriales puesto que permiten conocer las cantidades y direcciones de variación o cambio (Weisstein 2016). En Ingeniería Química los operadores más usados son el gradiente, la divergencia, el Laplaciano y la derivada sustancial. Para estudiar como se dispersa el gas luego de su liberación accidental, debemos determinar el cambio en $c(x,y,z,t)$, y lo haremos usando el operador diferencial $\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right]$, llamado operador diferencial vectorial o *Nabla*.

La aplicación de ∇ sobre el campo escalar c nos da el *Gradiente* ∇c , o la dirección del espacio en la que c cambia más rápidamente desde un punto de observación. Su magnitud $|\nabla c|$ es igual a la máxima razón de cambio de c (Jenson y col., 1977). El gradiente de la concentración $c(x,y,z,t)$ es un vector cuyas componentes indican la variación del escalar en una dirección determinada del espacio, tal como se expresa en la ecuación (1):

$$\nabla c = \left[\frac{\partial c}{\partial x} \quad \frac{\partial c}{\partial y} \quad \frac{\partial c}{\partial z} \right] = \left[\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right] c \quad (1)$$

La primera Ley de Fick nos dice que el flujo másico del gas ($\mathbf{J}$) (moles transferidos por unidad de área por unidad de tiempo) es proporcional al gradiente negativo de la concentración $-\nabla c$ (negativo porque la transferencia se produce de mayor a menor concentración), y a una constante de dispersión $\mathbf{K}$, cuyo valor depende de la dirección. Sólo en un medio isotrópico $\mathbf{K}$ no cambia y la difusión se realiza con la misma facilidad en todas las direcciones. En el mezclado turbulento, el aire es un medio anisótropo, y $\mathbf{K}$ puede ser

representado por un tensor como el mostrado en la ecuación (2). La magnitud de cada componente tensorial depende de la estabilidad atmosférica, una medida de la turbulencia, que es consecuencia de la radiación solar, la velocidad del viento, entre otros factores. Para facilitar la explicación de los operadores diferenciales, suponemos aquí que las componentes tensoriales permanecen constantes en el tiempo y con el desplazamiento sobre el campo escalar de la concentración.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Usando el gradiente negativo de la concentración $-\nabla c$ y el tensor $\mathbf{K}$, el flujo del gas ($\mathbf{J}$) que se dispersa en la atmósfera queda definido por la ecuación (3):

$$\mathbf{J} = \mathbf{K} \nabla c = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial c}{\partial x} & \frac{\partial c}{\partial y} & \frac{\partial c}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

En la figura 1 observamos una representación esquemática de nuestro caso de estudio. Alrededor del tanque establecemos el espacio al que representaremos usando un sistema de coordenadas cartesianas. Para evaluar cómo se dispersa el gas, tomamos un volumen de control, el pequeño cubo de aire que se observa; y que es penetrado por las tres componentes vectoriales del flujo ($\mathbf{J}$). Un balance de masa en el interior de este pequeño cubo nos indica que en ausencia de reacciones químicas de degradación o producción, la acumulación/desacumulación de gas es igual a la suma de las variaciones del flujo ($\mathbf{J}$) en las tres direcciones del espacio.

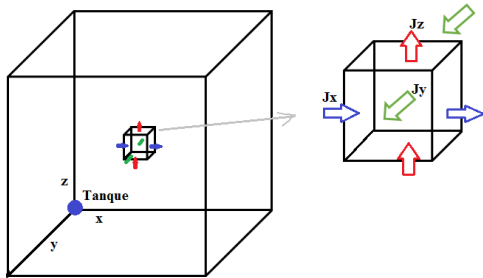


Figura 1 Representación esquemática de la dispersión del gas

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial z} \quad (4)$$

Podemos usar el operador diferencial vectorial ∇ y el Producto Punto o Producto Escalar ($\cdot$) e incorporar la definición para $\mathbf{J}$ para simplificar la ecuación (4), de tal forma que tiene la ecuación (5):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right] \cdot [J_x \quad J_y \quad J_z] \quad (5)$$

De esta forma, el balance de masa que describe la acumulación o desacumulación del contaminante en una porción de la atmósfera, queda representado por la ecuación (6) (Jacobson 1999):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{J} = (\nabla \cdot \mathbf{K} \nabla) c \quad (6)$$

En la ecuación (6), c es la concentración del contaminante expresada en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\mathbf{K}$ es el coeficiente de dispersión turbulenta (en m^2/s). Al producto escalar entre el vector ∇ y cualquier otro vector se le denomina Divergencia del Campo Vectorial. En nuestro caso la acumulación/desacumulación de la concentración del gas es igual a la Divergencia del Flujo másico ($\nabla \cdot \mathbf{J}$). Bajo la convención de que $\mathbf{J}$ es positivo (+) si sale del volumen, y negativo (-) si entra al volumen, entonces si la divergencia del flujo $\nabla \cdot \mathbf{J}$ es positiva en el punto de observación, es porque lo que sale es más grande que lo que entra en nuestro cubo de aire, y por tanto hay desacumulación de materia dentro de la unidad. Una solución a la ecuación (6), cuando se considera un proceso de dispersión bidimensional (sin mezclado vertical), es la llamada campana de dispersión gaussiana (7), donde t es el tiempo, Q es la cantidad de contaminante liberado en un instante de tiempo $t = 0$ en el punto origen de coordenadas ($x = 0, y = 0, z = 0$) (De Nevers, 1998):

$$c(x, y, t) = \frac{Q}{4\pi t \sqrt{K_x K_y}} \exp \left(- \left(\frac{1}{4t} \right) \left(\frac{x^2}{K_x} + \frac{y^2}{K_y} \right) \right) \quad (7)$$

Para visualizar la forma de distribución espacial del gas, debemos calcular el valor de $c(x, y, t)$ para cada punto (x, y) en un tiempo t dado. Esta tarea es tediosa y laboriosa si no se usan las herramientas adecuadas, por lo que es necesario complementar la enseñanza de un software para representación gráfica. Existe un sin número de opciones, aquí presentamos a MatLab, MatrixLaboratory, (MatLab, 2012) por la versatilidad de los paquetes de trabajo que incorpora, la robustez de sus numerosas rutinas de cálculo, la poderosa interfase para la representación gráfica en 2D y 3D; y la capacidad de manejar grandes cantidades de datos. Tales características convierten a MatLab en la herramienta ideal para la simulación de procesos químicos, donde son comunes los sistemas de ecuaciones algebraicas y ecuaciones diferenciales altamente no lineales y de múltiples variables. El siguiente paso en nuestra labor docente es migrar a una opción de software libre equivalente. Para la representación del campo escalar de la concentración $c(x, y, t)$ seguimos tres pasos: primero, creamos un mallado para simular el espacio $\mathbb{R}^2$ usando el comando meshgrid (línea 8), esto nos ofrece

una matriz con todos los pares (x,y) formados a partir de vectores individuales para x y y , tal como se muestra en el código 1. Hemos seleccionado un área de 2000m alrededor del tanque. El segundo paso es evaluar el campo escalar $c(x,y,t)$ (línea 12), y el tercer paso es realizar la representación grafica, usando las coordenadas (X,Y,c) . Aquí mostramos dos alternativas con los comandos `surf` (línea 24), mostrando sus resultados en un arreglo de gráficos a través del comando `subplot` (líneas 16 y 23). El campo escalar de concentración para un tiempo de 10min se muestra en la figura 2. El resto de líneas de código permiten el etiquetado de ejes, la leyenda del mapa de color, etc., herramientas que son enseñadas en clases introductorias sobre el software.

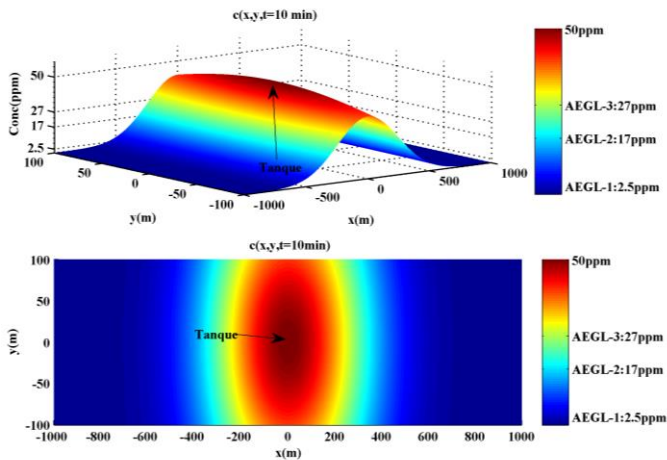


Figura 2 Representación gráfica del campo escalar de la concentración

La figura 2 nos muestra dos vistas del campo escalar de la concentración del gas a un tiempo $t = 10min$, observamos como la concentración es superior en las cercanías del tanque (ubicado en el origen $(x = 0, y = 0)$, y varía generando una campana gaussiana (simétrica alrededor del tanque, y con una varianza constante en ambas direcciones, pero superior en la dirección x (línea 10 del código). En una sesión de clases puede jugarse con la relación de magnitud entre las componentes del coeficiente de dispersión turbulenta (K), y lograr la comprensión del efecto de la turbulencia. Dada la toxicidad del gas (HCN), un agente sistémico de gran rapidez que provoca fallas simultáneas en los sistemas nervioso central, cardiovascular y pulmonar (NIOSH y Health, 2015); presentamos en la figura 2 los límites de exposición AEGL, *AcuteExposureGuidelinesLevel*, para un tiempo de exposición de 10min. En el nivel AEGL-1 = 2.5ppm se esperan nulos o bajos efectos sobre la salud, en el nivel AEGL-2 = 17ppm se observa depresión del sistema nervioso central y por tanto disminución de capacidad de movimiento, y para el nivel AEGL-3 = 27ppm se tiene la muerte (NRSSAEGL 2002). La figura 2 nos indica que se espera fatalidad para todos los seres humanos en un radio de

300m alrededor del tanque, si han permanecido expuestos al gas durante $t = 10min$. Para demostrar la utilidad del Gradiente imaginemos ahora que debe establecerse una ruta de escape óptima en un plan de emergencia, por lo que debemos determinar la dirección en la que el desplazamiento conduce a la reducción más rápida de la concentración del gas. Hemos aprendido esta dirección viene dada por el gradiente negativo de la concentración, $-\nabla c$, mostrado en la ecuación (8):

$$\nabla c(x,y,t) = - \left[\frac{C(x,y,t)K_x}{2t} \quad \frac{C(x,y,t)K_y}{2t} \right] \quad (8)$$

Código 1 Construcción y representación del campo escalar

```
1 %% Preparacion
2 clear all
3 clc
4 close all
5 % Introduccion de datos
6 x=[-1000:1:1000]; % Escalado en x
7 y=[0:100]; % Escalado en y
8 [X,Y]=meshgrid(x,y); % Mallado (x,y)
9 Q=11960452; % Gas liberado mg
10 K=[50 20]; % Coef. Dispersión m/
11 % Definición de Campo Escalar
12 C=@(t)Q/4/pi/t/sqrt(K(1)*K(2))...
13 .*exp(-(1/4/t)*(X.^2./K(1)+Y.^2./K(2))); %
14 % Representacion Grafica
15 figure
16 subplot(2,1,1)
17 surf(X,Y,C(600))
18 xlabel('x(m)')
19 ylabel('y(m)')
20 zlabel('c(ppm)')
21 colorbar
22 title('Concentracion c(x,y,t=10 min)')
23 subplot(2,1,2)
24 surface(X,Y,C(600))
25 xlabel('x(m)')
26 ylabel('y(m)')
27 zlabel('c(ppm)')
28 colorbar
29 title('Concentracion c(x,y,t=10 min)')
```

Para representar gráficamente el campo vectorial del gradiente de concentración, seguimos tres pasos (Ver código 2) primero creamos el mallado de puntos (x,y) con el comando `meshgrid` (línea 4) y evaluamos la función $c(x,y,t)$ para un tiempo $t = 10min$ (línea 6); el segundo paso es evaluar las componentes del vector gradiente, identificadas como p_x (línea 7) y p_y (línea 8) siguiendo las relaciones definidas en la ecuación (8). El tercer y último paso la representación del campo vectorial del gradiente a través del comando `quiver` (línea 14), que requiere cuatro argumentos, dos coordenadas de posicionamiento del vector (X, Y) , provenientes del mallado (línea 4), y dos componentes vectoriales p_x (línea 7) y p_y (línea 8). El resultado se muestra en la figura 3, donde observamos que para cualquier ubicación, la persona debe correr siguiendo una dirección radial lejos del tanque.

Código 2 Construcción del campo vectorial del gradiente

```

1 % Gradiente
2 x=[-500:50:500]; % Escalado en x
3 y=[-100:10:100]; % Escalado en y
4 [X,Y]=meshgrid(x,y); % Mallado (x,y)
5 C=@(t)Q/4/pi/t/sqrt(K(1)*K(2))...
6     .*exp(-(1/4/t)*(X.^2./K(1)+Y.^2./K(2)));
7 px=@(t)-C(t).*(X./(2.*t.*K(1)));
8 py=@(t)-C(t).*(Y./(2.*t.*K(2)));
9 figure
10 contour(X,Y,C(600)); % Lineas de contorno
11 colorbar
12 hold on
13 % Componentes del vector gradiente
14 quiver(X,Y,-px(600),-py(600))
15 xlabel('x (m)')
16 ylabel('y (m)')
17 title('Gradiente de c(x,y,t=10min)')

```

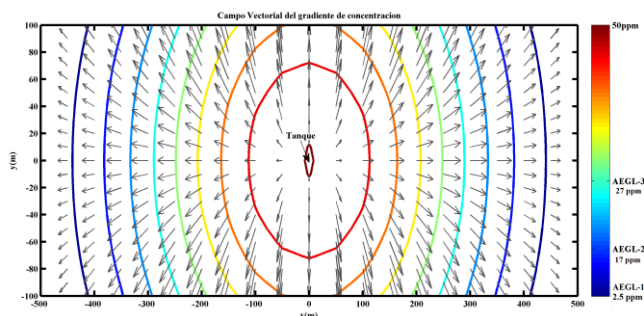


Figura 3 Representación gráfica del campo vectorial del gradiente

Con este ejemplo hemos mostrado la utilidad de los conceptos de campo escalar, gradiente y divergencia, y la importancia del uso de una herramienta de cálculo y representación gráfica.

3.2 El equilibrio de fases en sistemas multicomponentes y los sistemas de ecuaciones no lineales

La inmensa mayoría de leyes y/o modelos que describen los fenómenos de la naturaleza implican dependencias no lineales entre sus variables descriptivas: por ejemplo las ecuaciones de estado para los gases reales, los modelos reológicos de fluidos, las ecuaciones del factor de fricción, las ecuaciones para las constantes de equilibrio químico de reacciones, etc. Bien puede decirse que en Ingeniería Química, todos los procesos, a excepción de algunos procesos de mezclado y/o separación simples, están regidos por ecuaciones no lineales.

De manera simple podemos decir que una ecuación no lineal, es aquella que no es lineal, es decir una que establece una relación entre la variable dependiente y las variables independientes ($x_1, x_2, \dots, x_n$) que no puede ser expresada como una combinación lineal de éstas; sino que es de naturaleza polinómica de grado superior a la unidad, exponencial, potencial, logarítmica, etc. De forma general una ecuación no lineal con n variables independientes puede expresarse a través de la ecuación (9):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (9)$$

Para una ecuación no lineal no se cumple que para cualquier incremento Δx_i de la variable independiente x_i se obtenga un incremento proporcional en la variable dependiente Δy , constante en su valor sin importar la magnitud del Δx_i . Por el contrario, un mismo incremento Δx_i en rangos distintos de x_i , puede conducir a incrementos distintos de Δy , tal como se muestra en la figura 4.

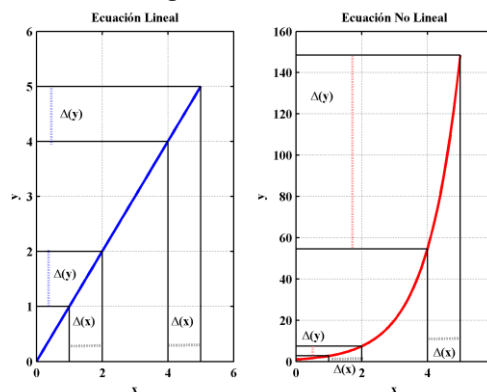


Figura 4 Ecuación Lineal vs. Ecuación No Lineal

En la ecuación no lineal, la respuesta en la variable dependiente Δy no depende únicamente de la suma de los cambios, que de forma independiente, causan las variaciones Δx_i ; sino que también refleja todas las posibles interacciones del tipo $\Delta x_i \times \Delta x_j \times \dots \times \Delta x_n$. El problema fundamental con las ecuaciones no lineales, es que el conjunto de n valores ($x_1, x_2, \dots, x_n$) que satisfacen la relación $y - f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ no puede hallarse de forma exacta a través de operaciones simples en todos los casos, sino en casos excepcionales. Generalmente este conjunto debe ser estimado en una serie repetitiva de operaciones matemáticas o proceso numérico iterativo, que puede ser estable o inestable dependiendo si se autodirige hacia la solución o no lo hace. Se dice que es estable si pequeñas variaciones en las condiciones iniciales o pequeños errores de redondeo conducen a pequeños errores en los resultados. Por el contrario si los errores se magnifican con cada iteración hasta el punto de conducir a soluciones erradas o a ninguna solución se habla de proceso iterativo inestable o mal condicionado (Kincaid y col., 1994; Mathews y col., 2000). Si con cada iteración, el proceso numérico es estable y se acerca a la solución, decimos que existe convergencia. Cuando ocurre lo contrario, aunque el proceso sea estable, hablamos de divergencia. Un proceso inestable es por naturaleza un proceso divergente.

Las ecuaciones no lineales que describen el equilibrio termodinámico de fases de sistemas multicomponentes en operaciones industriales como la destilación, la extracción líquido-líquido, la absorción, etc.; se caracterizan por ser altamente no lineales, con variables que por su naturaleza, difieren entre sí en varios órdenes de magnitud (por ejemplo, concentraciones en el rango de las partes por billón, y

flujos másicos en millones de unidades de masa por unidad de tiempo). Este comportamiento hace que la convergencia del método iterativo sea difícil de lograr sin una buena condición inicial, seleccionada con un buen conocimiento de los principios fisicoquímicos que rigen al fenómeno en estudio. Como un ejemplo veamos como determinar la concentración y relación másica de las fases líquidas en equilibrio termodinámico durante una operación de producción de etanol puro o absoluto por extracción con benceno en una destilación azeotrópica.

El etanol y el agua no pueden separarse completamente por destilación simple debido a que presentan comportamiento azeotrópico, es decir forman una solución que ebulle con igualdad de composición para sus fases vapor y líquida. La concentración alcohólica de este azeotropo es siempre inferior al 100% molar, pero aumenta su valor cuando la destilación se realiza a presiones inferiores a la atmosférica (destilación al vacío). Para producir etanol absoluto se inicia con una destilación al vacío, generándose una solución cercana a la pureza, que posteriormente se mezcla con un solvente como el benceno, para generar una mezcla heterogénea de soluciones conjugadas que se destila para dar etanol puro. A esta destilación se le llama destilación azeotrópica (Uyazany col., 2004)

Cuando dos compuestos son muy similares en la forma, tamaño y polaridad de sus moléculas, se dice que manifiestan afinidad química, por lo que pueden disolverse uno en el otro, generando mezclas homogéneas en todo el rango de composición posible, en lo que se denomina miscibilidad infinita, tal es el caso del sistema etanol-agua. Cuando empiezan a presentarse diferencias entre las moléculas, los compuestos se mezclan pero hasta cierta composición, donde ocurre una separación de fases, generándose dos fases líquidas, cada una saturada en el otro compuesto. Este fenómeno llamado miscibilidad parcial, implica el establecimiento del equilibrio termodinámico para cada compuesto: igualdad de potencial químico (μ), temperatura (T) y presión (P) en cada una de las fases líquidas. Un ejemplo de este comportamiento es el que resulta de mezclar soluciones acuosas de etanol con benceno.

En un sistema ternario benceno (1)-agua (2)-etanol (3), la miscibilidad parcial se manifiesta con la aparición de dos fases líquidas (llamadas soluciones conjugadas, una rica en agua (fase acuosa, L1) y otra rica en benceno (fase orgánica, L2), entre las que el etanol se distribuye desigualmente, concentrándose en L1 debido a la mayor afinidad química que muestra con el agua. Las condiciones para el equilibrio termodinámico se muestran en las ecuaciones (10a)-(10c):

$$T^{L1} = T^{L2} = T \quad (10a)$$

$$P^{L1} = P^{L2} = P \quad (10b)$$

$$\mu_1^{L1} = \mu_1^{L2} \mid \mu_2^{L1} = \mu_2^{L2} \mid \mu_3^{L1} = \mu_3^{L2} \quad (10c)$$

A una temperatura T constante, el potencial químico (μ_i) es un indicativo de la Energía Libre de Gibbs que posee la sustancia i , y que le permite transferirse de manera espontánea,

desde un valor alto a un valor bajo de potencial. Su valor para una sustancia i en una fase determinada, depende de la composición en fracción molar (x_i) y del coeficiente de actividad (γ_i). La deducción de las relaciones termodinámicas que lo definen y asocian a (γ_i) escapan del objetivo de este estudio, por lo que estableceremos sin demostración, que a una temperatura y presión determinadas, el equilibrio líquido-líquido entre L1 y L2 se logra cuando se cumplen las ecuaciones (11a)-(11c), donde hemos simplificado la notación haciendo que γ_{ij} represente al coeficiente de actividad de la sustancia $i = 1...3$ en la fase $j = 1...2$ en las ecuaciones (11a)-(11c):

$$x_{11}\gamma_{11} = x_{12}\gamma_{12} \quad (11a)$$

$$x_{21}\gamma_{21} = x_{22}\gamma_{22} \quad (11b)$$

$$x_{31}\gamma_{31} = x_{32}\gamma_{32} \quad (11c)$$

Estas ecuaciones pueden simplificarse definiendo un coeficiente de distribución o reparto K_i para cada sustancia i que representa el cociente de las composiciones en cada fase líquida al equilibrio, según las ecuaciones: (12a)-(12c):

$$K_1 = \frac{x_{11}}{x_{12}} = \frac{\gamma_{12}}{\gamma_{11}} \quad (12a)$$

$$K_2 = \frac{x_{21}}{x_{22}} = \frac{\gamma_{22}}{\gamma_{21}} \quad (12b)$$

$$K_3 = \frac{x_{31}}{x_{32}} = \frac{\gamma_{32}}{\gamma_{31}} \quad (12c)$$

Para estimar los valores de γ_{ij} del sistema benceno (1) agua (2)-etanol (3) usamos modelos como UNQUAC (Abrams y Prausnitz, 1975), que se caracterizan por ser altamente no lineales respecto a variables como la composición (x_i), a los parámetros ($r_i, q_i, \phi_i, \theta_i$), relacionados con el área, volumen, la fracción superficial y la fracción volumétrica del compuesto puro i en una solución, y al parámetro (τ_{ij}) indicativo de la energía de interacción molecular del par $i - j$. El valor z es el número de coordinación. El coeficiente de actividad γ_{ij} se determina con el conjunto de ecuaciones en (13a)-(13f) (Abrams y col., 1975). En la tabla 1 se muestran los valores necesarios para el sistema benceno (1)-agua (2)-etanol (3) (Abrams y col., 1975, Prausnitz y col., 1999).

Tabla 1 Parámetros del modelo UNQUAC para el sistema Benceno (1)-Agua (2)-Etanol (3) a 25oC (Anderson y Prausnitz, 1978) (Prausnitz et al., 1999)

Sustancia	$a_{ij} (K)$			r_i	$q_i \left(\frac{q_i'}{q_i} \right)$
Benceno(1)	0	2057.42	1131.13	3.19	2.40 (2.40)
Agua(2)	115.13	0	573.61	0.92	1.40 (1)
Etanol(3)	-149.34	-163.72	0	2.11	1.97 (0.92)

Para conocer la composición de las fases líquidas a una temperatura y presión dadas, debemos adicionar a las ecuaciones (13a)-(13f) y (12a)-(12c), las expresiones del balance de masa (14a)-(14e), que establecen que la suma de las fracciones molares debe ser igual a la unidad, y que la cantidad total de un componente debe ser igual a la suma de sus moles en ambas fases, por lo que debe cumplirse la ecuación (14a). La cantidad total de i se define usando su composición global xG_i y la relación molar entre las fases líquidas

das $\beta=L2/L1$.

$$\ln \gamma_i = \ln \frac{\phi_i}{x_i} + \left(\frac{z}{2}\right) q_i \ln \frac{\theta_i}{\phi_i} + l_i \quad (13a)$$

$$- \frac{\phi_i}{x_i} \sum_j x_j l_j - q'_i \ln \left(\sum_j \theta'_j \tau_{ij} \right) + q'_i - q'_i \sum_j \frac{\theta'_j \tau_{ij}}{\sum_k \theta'_k \tau_{kj}}$$

$$l_j = \left(\frac{z}{2}\right) (r_j - q_j) - (r_j - 1) \quad (13b)$$

$$\theta_i = \frac{q_i x_i}{\sum_j q_j x_j} \quad (13c)$$

$$\theta'_i = \frac{q'_i x_i}{\sum_j q'_j x_j} \quad (13d)$$

$$\phi_i = \frac{r_i x_i}{\sum_j r_j x_j} \quad (13e)$$

$$\tau_{ij} = \exp - \left(\frac{a_{ij}}{T} \right) \quad (13f)$$

$$x_{11} + x_{21} + x_{31} = 1 \quad (14a)$$

$$x_{12} + x_{22} + x_{32} = 1 \quad (14b)$$

$$x_{G1} (1 + \beta) = x_{11} + x_{12} \beta \quad (14c)$$

$$x_{G2} (1 + \beta) = x_{21} + x_{22} \beta \quad (14d)$$

$$x_{G3} (1 + \beta) = x_{31} + x_{32} \beta \quad (14e)$$

El sistema de ecuaciones no lineales a resolver: (12a)-(12c), (13a)-(13f) y (14a)-(14e), puede simplificarse a uno con siete incógnitas, e incluirse en un archivo auxiliar de función, tal como se explica en el código 3. Entre las líneas 2-8 se presentan comentarios con la nomenclatura para las variables de interés agrupadas en la matriz x . Entre las líneas 9 y 13 establecemos las variables globales, que serán usadas en las subrutinas de cálculo. En la línea 14 se construye una matriz con el trío de composiciones de cada solución conjugada, para ser enviada a la subrutina de estimación de los coeficientes de actividad por el modelo de UNIQUAC en las líneas 15 y 16. Con (γ_{ij}) calculamos los coeficientes de reparto (K_i) en la línea 17. Escribimos luego el sistema de ecuaciones entre las líneas 18 y 26.

Para la resolución usamos el código 4, que inicia con la preparación típica (vaciado del almacenamiento, borrado de pantalla y cierre de ventanas), además de la definición de las variables globales. Posteriormente entre las líneas 11 y 23, se introducen los valores de la tabla 1 y la composición global del sistema a estudiar. En la línea 25, establecemos la condición inicial para el método iterativo, y finalmente en la línea 28, usamos el comando *fsolve* para resolver el sistema de ecuaciones, cuyos argumentos o variables de entrada son el archivo auxiliar con las funciones (construido en el código 3) y la condición inicial x_0 ; se incluye la opción del despliegue en pantalla de las iteraciones, y los valores de $x_G y T$. Debe notarse que no se especifica ningún método iterativo,

puesto que MatLab cuenta con tres opciones, *trustregion-dogleg* (opción por defecto), *trust-region-reflective*, *Levenberg-Marquardt*. Por su complejidad matemática, ninguno de estos métodos numéricos se enseña a nivel de pregrado, donde sólo se cubren los métodos tradicionales de iteración de punto fijo o sustitución sucesiva, bisección de Bolzano, secante, regla falsi y Newton-Raphson. Sin embargo la complejidad de nuestro sistema de ecuaciones, no permite alcanzar convergencia con los métodos tradicionales. Se hace necesario instruir a los estudiantes en el uso de métodos numéricos más robustos y estables como los ofrecidos por MatLab.

Código 3 Construcción del archivo auxiliar para el sistema de ecuaciones no lineales a resolver

```
1 function G=LLE_UNIQUAC3(x,xG,T)
2 % x11=x(1) x21=x(2)
3 % x31=x(3) x12=x(4)
4 % x22=x(5) x32=x(6)
5 % beta=x(7) L2/L1
6 % x11+x21+x31=1 Fase ac.
7 % x12+x22+x32=1 Fase org.
8 % T en K
9 global Ren
10 global r
11 global q
12 global qpr
13 global a
14 xx=[x(1) x(2) x(3); x(4) x(5) x(6)]';
15 gammaL1=UNIQUAC(T,xx(:,1),r,q,qpr,a); %Fase ac.
16 gammaL2=UNIQUAC(T,xx(:,2),r,q,qpr,a); %Fase org.
17 K=gammaL1./gammaL2;
18 G=[x(4)-K(1).*x(1); % Ec.12a
19 x(5)-K(2).*x(2); % Ec.12b
20 x(6)-K(3).*x(3); % Ec.12c
21 x(1)+x(2)+x(3)-1; % Ec.14a
22 x(4)+x(5)+x(6)-1; % Ec.14b
23 x(4)-(xG(1)-x(7)).*x(1)./(1-x(7)); % Ec.14c
24 1-(xG(1)./(x(7)+K(1).*(1-x(7)))+...
25 xG(2)./(x(7)+K(2).*(1-x(7)))+...
26 xG(3)./(x(7)+K(3).*(1-x(7))))]; % Ec.14c+14d+14e
```

Código 4 Resolución del sistema de ecuaciones no lineales

```
1 % Preparacion
2 clear all
3 clc
4 close all
5 format long
6 global Ren
7 global r
8 global q
9 global qpr
10 global a
11 % Introduccion de datos
12 Ren=1.986; % cal/mol/K
13 T=30; % oC
14 % Parametros UNIQUAC
15 r=[3.19 0.92 2.11]; % adim
16 q=[2.40 1.40 1.97]; % adim
17 qpr=[2.40 1.00 0.92]; % adim
18 a=[0 2057.42 1131.13;
19 115.13 0 573.61;
20 -149.34 -163.72 0]; % K
21 % Posicion del ELL
22 % Composicion Global
23 xG=[0.375 0.375 0.25];
24 % Condicion Inicial
25 x0=[0.75 0.06 0.19 ...
26 0.04 0.65 0.31 0.5];
27 options = optimset('Display','iter');
28 [x,fval]=fsolve(@LLE_UNIQUAC3,x0,options,xG,T)
```

Una vez alcanzada la convergencia del método iterativo, se obtiene que un sistema de composición molar global [37.5;37.5;25.0] % en benceno(1)-agua(2)-etanol(3), se separa en dos fases con una relación $\beta = 49.4\%$. La fase acuosa con una composición molar [5.44;65.17;29.39] % y la

orgánica de [70.33;9.16;20.51] %. Ambas fases se encuentran unidas por una línea recta verde en la figura 7, y se observa que el modelo falla al describir la fase orgánica, dando una solubilidad inferior a la experimentalmente determinada.

Las figuras 5 y 6 muestran los resultados del problema cuando se selecciona adecuada e inadecuadamente la condición inicial para el método iterativo, por lo que durante la enseñanza de este tópico debe hacerse hincapié en el conocimiento del fenómeno. Una selección a ciegas de la condición inicial puede resultar en un proceso iterativo inestable o divergente, que además de frustrar al estudiante, le puede impedir su avance a las etapas posteriores, que pudieran ser la comprensión total del concepto de equilibrio líquido-líquido, o el completar de un ejercicio de práctica o una evaluación. Cuando se aplica el código 4 para estudiar un conjunto más amplio de composiciones globales, las soluciones pueden ser usadas para construir el diagrama del equilibrio de fases líquidas del sistema benceno-agua-etanol que se muestra en la figura 7.

El mismo código 4 puede ser adaptado para estudiar la influencia de la composición global sobre las soluciones conjugadas incluyendo el concepto de relación de solvente, o en el estudio de la influencia de la temperatura sobre la posición del equilibrio líquido-líquido. Las posibilidades de aplicación son infinitas, y no pueden ser plasmadas en este documento, pero pueden ser exploradas durante una o varias sesiones de clase, para ofrecerle al estudiante la visión global que requiere desarrollar como futuro ingeniero.

Iteration	Func-count	f(x)	Norm of step	First-order optimality	Trust-region radius
0	8	0.014091		0.647	1
1	16	0.00049955	0.048705	0.0954	1
2	24	2.95201e-06	0.0191041	0.00655	1
3	32	2.80893e-11	0.00177888	2.01e-05	1
4	40	5.72773e-21	4.27004e-06	2.76e-10	1

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero as measured by the default value of the `function_tolerance`, and the `problem appears regular` as measured by the gradient.

<stopping criteria details>

Figura 5 Resultados del código 4 con una condición inicial adecuada

98	673	1.47776e-10	0.000103572	0.0452	0.000104
99	681	1.3974e-10	0.000103572	0.048	0.000104
100	689	1.3209e-10	0.000103572	0.0511	0.000104
101	697	1.24812e-10	0.000103572	0.0545	0.000104
102	705	1.1793e-10	0.000103572	0.0582	0.000104

Solver stopped prematurely.

fsolve stopped because it exceeded the function evaluation limit, `options.MaxFunEvals` = 700 (the default value).

Figura 6 Resultados del código 4 con una condición inicial inadecuada

4 Conclusiones

Con la implementación de la computación científica en la enseñanza de la Ingeniería Química logramos desarrollar en los estudiantes las competencias profesionales que requie-

ren para ser exitosos en el mundo actual. Hemos demostrado que al lograr que el estudiante formule y resuelva el modelo descriptivo, adquiere una mejor comprensión del fenómeno; ya que podemos enfocarnos en la discusión del proceso desde el punto de vista ingenieril, y no en el procedimiento para resolver las ecuaciones. De aquí que recomendemos la inclusión de la enseñanza de los métodos numéricos y las herramientas para implementarlos, en la formación básica de las carreras de Ingeniería; y su uso continuo durante los cursos de la formación profesional; siguiendo las tendencias de los programas en Ingeniería más prestigiosos del mundo.

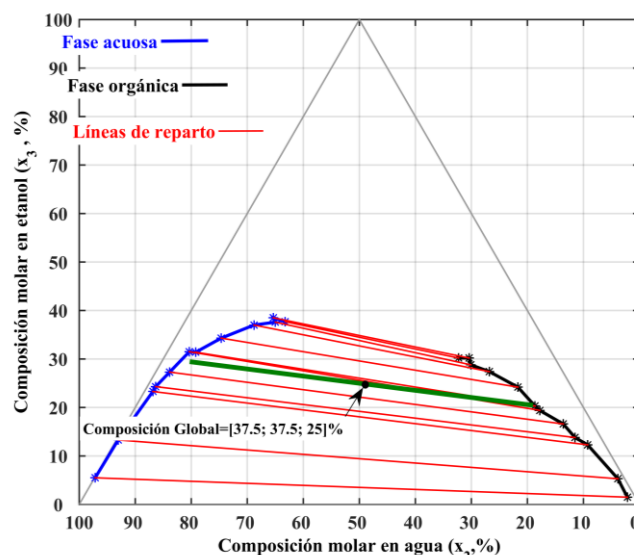


Figura 7 Diagrama del equilibrio termodinámico de fases para el sistema ternario benceno (1)-agua (2)-etanol (3) a 30°C (Brandani et al., 1985)

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes (ULA) de Venezuela, en especial al personal que labora en el Laboratorio Docente de Computación, por su colaboración permanente con el mantenimiento de los equipos. Su participación ha sido vital en la cristalización de este proyecto de enseñanza, que se inició en el 2008 con el curso de Matemáticas Especiales, y se ha extendido a más de una decena de cursos de pregrado y postgrado en Ingeniería Química (ULA). Un agradecimiento especial a todos los estudiantes que han tomado nuestras materias, ayudándonos a mejorar nuestras técnicas docentes; pero sobre todo a aquellos que han puesto en práctica las herramientas computacionales en cursos posteriores, logrando exitosamente sus objetivos de aprendizaje en esta nueva era de la humanidad

Referencias

Abrams DS, Prausnitz JM, 1975, Statistical thermodynamics of liquid mixtures: A new expression for the excess gibbs energy of partly or completely miscible systems, *AIChE J*, Vol. 21, no. 1, pp. 116–128.

Anderson TF, Prausnitz JM, 1978, Application of the UNIQUAC equation to calculation of multicomponent phase equilibria. 2. Liquid-Liquid equilibria, *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 17, no. 4, pp. 561–567.

Austin GT, 1997, *Manual de procesos químicos en la Industria*, McGraw-Hill Interamericana.

Brandani V, Chianese A, Rossi M, 1985, Ternary liquid-liquid equilibrium data for the water-ethanolbenzene system, *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol. 30.

De Nevers N, 1998, *Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire*, McGraw-Hill Interamericana.

Hutchison MA, Follman DK, Sumpter M, Bodner GM, 2006, Factors influencing the self-efficacy beliefs of first-year engineering students, *Journal of Engineering Education*, Vol. 95, no. 1, pp. 39–47.

Jacobson MZ, 1999, *Fundamentals of Atmospheric Modeling*, Cambridge University Press.

Jenson V, Jeffreys G, 1977, *Mathematical Methods in Chemical Engineering*, Academic Press.

Keil F, Mackens W, Voß H, Werther Je, 1996, *Scientific Computing in Chemical Engineering*, Vol. 1, 1ª-ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Kincaid D, Cheney W, 1994, *Análisis Numérico: Las Matemáticas del Cálculo Científico*, Addison-Wesley Iberoamericana.

Lamancusa JS, Jorgensen JE, Zayas-Castro JL, 1997, The learning factory—a new approach to integrating design and manufacturing into the engineering curriculum, *Journal of Engineering Education*, Vol. 86, no. 2, pp. 103–112.

Linstrom PJ y Mallard WG (Editores), 2005, *NIST Chemistry WebBook*, NIST Standard Reference Database Number 69, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 20899, URL <http://webbook.nist.gov>.

Mathews JH y Fink KD, 2000, *Métodos numéricos con MatLab*, Prentice Hall.

MatLab ML, 2012, version 8.0.0.783 (R2012b), The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.

NIOSH TNiFOS y Health, 2015, Hydrogen cyanide(ac): Systemic agent, visited on 20/08/2016, URL <http://www.cdc.gov/niosh/ershdb/emergencyresponsecard29750038.html>.

NRSSA EGL NRCUSoAEGL, 2002, Hydrogen Cyanide: Acute Exposure Guideline Levels, cap. 5, National Academies Press (US), visited on 20/08/2016, URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK207601/>.

Prausnitz J, Lichtenthaler R, de Azevedo E, 1999, *Molecular Thermodynamics of Fluid-Phase Equilibria*, 3ª-ed., Prentice-Hall.

Uyazan A, Gil I, Aguilar J, Rodríguez G, y Caicedo L, 2004, *Deshidratación del etanol*, Ingeniería e Investigación, Vol. 24.

Weisstein EW, 2016, Vector derivative, visited on 20/08/2016, URL <http://mathworld.wolfram.com/Vector-Derivative.html>.

Silvia Margarita Calderón: Profesora Titular de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes (ULA, Vzla). Graduado en Ingeniería Química (1998, ULA, Vzla), MSc en Matemática Aplicada a la Ingeniería (2002, ULA, Vzla), PhD en Ingeniería Química (2006, USF, EE.UU.).

Edinzo Jesús Iglesias Sánchez: Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes (ULA, Vzla). Graduado en Ingeniería Química (1993, ULA, Vzla), MSc en Ingeniería Química (1998, ULA, Vzla), PhD en Ingeniería Química (2006, USF, EE.UU.). Correo electrónico: iedinzo@ula.ve

Capítulo 44

Influencia de la formulación fisicoquímica sobre la persistencia de emulsiones en procesos de deshidratación de petróleo

Fernández, Jesús; Márquez, Ronald; Delgado-Linares, José; Salager, Jean-Louis; Forgiarini, Ana*

Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos (FIRP)
Escuela de Ingeniería Química. Universidad de Los Andes, Mérida –Venezuela.
anafor@ula.ve

Resumen

La formación de emulsiones de agua en crudo muy estables en la producción, transporte y procesamiento de petróleo genera incremento de la viscosidad, deposición orgánica en equipos de procesamiento y afecta negativamente la producción de petróleo. Esta alta persistencia de las emulsiones es atribuida principalmente a la presencia de una película interfacial rígida formada por los componentes del crudo con actividad superficial, tales como asfaltenos, resinas, ceras, sólidos y ácidos nafténicos. Estas sustancias influyen en las propiedades interfaciales, generando el retraso del drenaje de la película de líquido inter-gota y evitando la coalescencia de las mismas. La ruptura de esta película requiere de la utilización de agentes surfactantes llamados demulsificantes, los cuales permiten que ocurra un cambio de las propiedades fisicoquímicas del sistema para encontrarse en una situación de formulación óptima, a saber un mínimo de tensión interfacial correspondiente a $HLD=0$, donde existe además un mínimo de estabilidad de las emulsiones. En este trabajo se estudia la influencia de la formulación fisicoquímica sobre la persistencia de emulsiones del sistema nonilfenoletoxilado de 6 EON/crudo venezolano de 8°API diluido en ciclohexano/fase acuosa (1% NaCl), y se discute acerca de la fenomenología que rige la persistencia de emulsiones estabilizadas por asfaltenos al realizar un barrido de formulación. Los resultados obtenidos demuestran que la concentración de asfaltenos determina para condiciones de $HLD>0$ la persistencia de las emulsiones, mientras que para condiciones de $HLD<0$ no tiene efecto sobre esta propiedad. Se verifica además que fuera de la región de inversión, el patrón fenomenológico en la persistencia de emulsiones petroleras es similar al observado en sistemas agua/surfactante/alcano.

ISBN: 978-980-11-1858-9



9 789801 118589

1 Introducción

La Influencia de la formulación sobre la persistencia de emulsiones

Los sistemas surfactante-aceite-agua (SOW) poseen un comportamiento fisicoquímico que depende de su formulación. Cuando una variable fisicoquímica se cambia en forma continua y sistemática, es decir, se realiza un barrido de formulación, la variación en las propiedades del sistema presenta un patrón fenomenológico general (Salager y col., 2001, 2010, 2013). En la denominada formulación óptima, la tensión interfacial exhibe un mínimo (Salager y col., 1979; Bourrel y col., 1980), las emulsiones que se forman a partir de estos sistemas se invierten, es decir, cambian su morfología de aceite en agua (O/W) a agua en aceite (W/O), o viceversa, y además su estabilidad es mínima (Salager y col., 1982); así, la persistencia y rompimiento de la película interfacial de emulsiones está directamente relacionada a la formulación fisicoquímica del sistema (Salager y col., 2010).

A una cierta condición de formulación óptima existe un equilibrio exacto de las interacciones entre el surfactante y el aceite de un lado de la interface, y entre el surfactante y el agua del otro lado (Salager y col., 2013). Si se cambia una variable, se altera el equilibrio y el sistema se aleja de esta condición, por lo que se necesita cambiar otra variable para restablecerlo (Salager, 1999). Se trata de una situación fisicoquímica muy precisa, y que para sistemas simples se ha modelado mediante una correlación numérica adimensional llamada Desviación Hidrofílica-Lipofílica o HLD (Hydrophilic-Lipophilic Deviation). El HLD es así una medida del desequilibrio de la afinidad del surfactante por las fases, y puede expresarse como una función generalizada de las variables de formulación (Salager y col., 1979, 2001, 2013). La ecuación (1) ha sido propuesta para sistemas conteniendo surfactantes no-iónicos del tipo alquil-fenoles o alcoholes polietoxilados (Delgado y col., 2016).

$$\text{HLD} = \text{SCP} + b S - k \text{ACN} - \varphi(A) + c_T \Delta T \quad (1)$$

donde *SCP* es un parámetro característico del surfactante que depende de su naturaleza, peso molecular, estructura e hidrofiliidad, *S* es la salinidad de la fase acuosa en porcentaje en peso de NaCl, *ACN* es el número de átomos de carbono del n-alcano, $\varphi(A)$ es una función que dependen del tipo y de la concentración de alcohol, ΔT indica la diferencia de temperatura respecto a una referencia, en general de 25°C, y los parámetros *b*, *k*, y c_T son coeficientes positivos que dependen de la naturaleza de los componentes. Si la fase aceite no es un n-alcano el ACN debe reemplazarse por su equivalente EACN (Salager y col., 2001).

La fenomenología involucrada en la (des)-estabilización de sistemas SOW emulsionados se ha estudiado desde hace más de 30 años (Salager y col. 1982, Antón y col., 1986), lo que ha permitido proponer que la formulación óptima representa una condición fisicoquímica ideal para procesos de deshidratación de petróleo (Salager 1990).

Principios de desestabilización química de emulsiones petroleras

Un problema importante en las diferentes etapas de procesamiento del petróleo es la alta persistencia de las emulsiones agua en crudo (W/O) que se forman. El mecanismo predominante por el cual estas emulsiones se encuentran estabilizadas se relaciona con la existencia de una película rígida, estable y de alta resistencia mecánica en la interfase agua – aceite (Álvarez y col., 2009, Kilpatrick 2012). Esta película está formada por sustancias levemente polares presentes en el crudo, como los asfaltenos, las resinas, y los ácidos nafténicos, y que se llaman en forma genérica surfactantes naturales, porque son agentes de superficie capaces de adsorberse en la interfase de las gotas (Salager 1990).

La ruptura de este tipo de emulsiones requiere el uso de sustancias que puedan cambiar la formulación fisicoquímica del sistema para que se encuentre en una condición de $\text{HLD} = 0$. Desde un punto de vista fundamental, para obtener una formulación óptima en un sistema que ya contiene un surfactante, puede añadirse otro surfactante de manera que la mezcla interfacial entre ellos resulte en $\text{HLD} = 0$. Bajo esta premisa, para desestabilizar una emulsión petrolera W/O, que se encuentra inicialmente en una condición de $\text{HLD} > 0$, se debe añadir un surfactante hidrofílico (demulsificante) que modifique el ambiente fisicoquímico interfacial desplazándolo a la formulación óptima ($\text{HLD} = 0$). Puede reconocerse que las condiciones de deshidratación son muy específicas ya que cantidades mayores de demulsificante producirían que el sistema se encuentre en una condición de $\text{HLD} < 0$, en cuyo caso emulsiones de crudo en agua (O/W) son propensas a formarse en forma estable (Salager 1990).

Investigaciones posteriores (Rondón y col., 2006, 2008, Delgado y col., 2016) han propuesto que la contribución anfífila global de la mezcla interfacial demulsificante – surfactantes naturales puede expresarse mediante una regla de mezcla lineal basada en el parámetro característico de cada surfactante (*SCP*) y su proporción (*X*) en la interfase; como primera aproximación se ha supuesto que se trata de una mezcla binaria entre dos pseudocomponentes, el surfactante “asfálténico” (*A*), que agrupa todos los surfactantes naturales, y el surfactante empleado como demulsificante (*D*) (Delgado y col., 2016). De acuerdo a lo anterior, el parámetro característico de la mezcla

anfifilicainterfacial (SCP_m) puede expresarse mediante la ecuación (2).

$$SCP_m = X_A SCP_A + X_D SCP_D \quad (2)$$

Existe entonces para un sistema conteniendo surfactantes naturales mezclado con demulsificantes un valor de SCP_m para el que se establece una composición interfacial en la que $HLD = 0$ según la ecuación (1). A esta condición fisicoquímica ocurre un mínimo de estabilidad o persistencia de las emulsiones de crudo y agua.

A pesar de que el concepto de formulación óptima ha orientado la comprensión de algunos fenómenos involucrados en la deshidratación química del petróleo, la fenomenología general no se conoce completamente. La dificultad reside en la existencia de efectos concomitantes en un sistema muy complejo desde el punto de vista fisicoquímico. Bajo esta concepción, diversas investigaciones desarrolladas en el Laboratorio FIRP o en colaboración con otras universidades y centros de investigación (Rondón y col., 2006, 2008; Pereira 2011, Delgado2016), se han aproximado a la frontera del conocimiento y han permitido explicar hasta cierto punto qué ocurre a nivel interfacial en la desestabilización de emulsiones petroleras. En estos trabajos se ha verificado que, para una amplia gama de deshidratantes, existe la presencia de un mínimo de estabilidad cuando están dosificados a una cierta concentración. Además, que existe una correlación entre la cantidad de demulsificante y la concentración de asfaltenos presentes en el sistema, encontrándose dos zonas: (i) un intervalo en el que la cantidad adsorbida de surfactante y de asfaltenos es proporcional, y (ii) un punto crítico sobre el cual aunque la concentración de asfaltenos se incrementa, la cantidad de surfactante necesaria para desestabilizar la película es la misma.

En este trabajo, se estudia la influencia de la formulación fisicoquímica sobre la persistencia de emulsiones del sistema nonilfenoletoxilado de 6 EON/crudo venezolano de 8 °API diluido en ciclohexano/fase acuosa (1% NaCl), y se discute acerca la fenomenología general que rige la persistencia de emulsiones en presencia de asfaltenos, en comparación con sistemas con aceites simples. Además, se relaciona este comportamiento con la ruptura de emulsiones de agua en crudo en procesos de deshidratación.

2 Experimental

2.1 Materiales

Demulsificantes. Se empleó nonilfenoletoxilado de 6 EON, proveniente de la casa comercial

WitcoCorporation en grado técnico. En la Tabla 1 se muestran las principales características de este surfactante.

Tabla 1. Características del demulsificante empleado (Delgado, 2016)

Surfactante	EON	PM, Da	SCP	Denominación
$C_{9}H_{19}C_6H_4(C_2H_4O)_6OH^a$	6	440	0,5	NPE - 6

^a Número promedio de óxidos de etileno EON = 6.

Fases acuosa y oleosa

La fase acuosa consistió en soluciones al 1% p/p de cloruro de sodio (J. T. Baker, México, grado analítico), y diferentes concentraciones de NPE - 6. Se empleó agua destilada a través de Milli-Q®. La fase aceite consistió en un crudo venezolano de 8° API diluido en ciclohexano (Merck, grado analítico), hasta alcanzar la concentración requerida de asfaltenos.

2.2 Métodos

Barridos de formulación.

La relación volumétrica agua a aceite (WOR) se fijó en uno. El volumen total de muestra para los sistemas SOW fue de 10 ml, y cada experiencia consistió en agregar en el mismo orden que se indica: 5 ml de fase acuosa y 5 ml de fase aceite en viales graduados. De acuerdo a la metodología propuesta por Rondón y col. (2006), la concentración de surfactante se indica respecto al volumen total (10 ml), mientras que la concentración de asfaltenos se expresa respecto a la fase aceite.

Los sistemas preparados se agitaron suavemente durante 30 segundos, y luego se dejaron en reposo por 24 horas en un baño termostatzado a $(30 \pm 1) ^\circ C$ para permitir su avance a condiciones de equilibrio. Este proceso de preequilibrio garantiza la ausencia de transferencia de masa ulterior y, en general, fenómenos fuera del equilibrio, que son a menudo complejos y pueden perturbar la morfología obtenida durante la agitación (Salager y col., 2002).

Preparación de emulsiones y medición de persistencia.

La emulsión de los sistemas SOW se llevó a cabo en viales graduados de 30 ml, empleando un agitador de turbina Ultraturax a 30000 rpm por un tiempo de 30 segundos. La emulsión se dejó en reposo a temperatura de $(30 \pm 1) ^\circ C$ en un baño termostatzado. Su persistencia se evaluó monitoreando en función del tiempo, el volumen separado de fase acuosa y de fase oleosa. La medida de la persistencia de la emulsión fue tomada como el tiempo necesario para separar el 60% del volumen total de cada fase.

Estudio del comportamiento de fase y fenomenología relacionada con el rompimiento de emulsiones.

Los experimentos fueron llevados a cabo mediante un barrido unidimensional, en el que se varió sistemáticamente la concentración de demulsificante en sistemas NPE - 6/ crudo diluido en ciclohexano/fase acuosa (1% NaCl) preparados a una concentración constante de asfaltenos, con la finalidad de determinar la concentración de demulsificante que permite desplazar el sistema a la formulación óptima. Se abarcó un intervalo de concentraciones de [0-500] ppm de demulsificante y [0-30000] ppm de asfaltenos. El estudio del comportamiento de fase consistió en la identificación de la morfología de la emulsión formada a lo largo del barrido, reconocimiento de la fase segregada y coalescida, e identificación de la formulación óptima de acuerdo a un mínimo en la persistencia de los sistemas emulsionados.

Conductividad eléctrica.

Los cambios en la morfología de la emulsión (inversión de W/O a O/W) fueron detectados por medidas de conductividad. Para ello se utilizó un conductímetro modelo CDM210 (RadiometerAnalytical Copenhagen), y las medidas se realizaron manteniendo en agitación suave y continua el sistema emulsionado para asegurar que se encontrara disperso homogéneamente.

3 Resultados y discusión

Fenomenología en la (des)estabilización de emulsiones que contienen asfaltenos

La influencia de la formulación fisicoquímica sobre la estabilidad de emulsiones ha sido estudiada ampliamente para sistemas modelo surfactante-aceite-agua, en los que generalmente la fase oleosa es un alcanocoma el heptano o mezclas refinadas como el queroseno (Salager y col. 1982, Antón y col., 1986). Los siguientes patrones fenomenológicos se han propuesto para estos "sistemas limpios" a partir del comportamiento observado en la variación de la estabilidad o tiempo de separación de las fases agua y aceite:

- (i) A los lados de la formulación óptima el tiempo de separación de la fase externa es generalmente más corto que el de la fase coalescente ^a.
- (ii) En las proximidades de la formulación óptima, e inclusive a esta condición, la estabilidad se encuentra en un mínimo, donde los valores de separación para ambas fases son esencialmente idénticos.

^a Si se considera como medida de persistencia la separación de la fase acuosa, a condiciones de $HLD < 0$ (emulsiones W/O) la desestabilización responde a una fase interna coalescente, y a condiciones de $HLD > 0$ (emulsiones O/W) a una fase externa segregada; lo contrario aplica si se considera la separación de la fase aceite.

De acuerdo a lo anterior, en o cerca de la formulación óptima la magnitud relativa entre los tiempos de separación de cada fase se invierte. Respecto a este comportamiento, Salager y col. en 1982 han explicado que este punto representa una inversión "transicional", como consecuencia de un cambio continuo en la composición de la interfase, en lugar de un cambio repentino en su curvatura.

En la presente investigación se emplearon sistemas SOW cuya fase oleosa es crudo diluido en ciclohexano. Se trata entonces de una fase oleosa conformada principalmente por ciclohexano conteniendo una mezcla compleja de hidrocarburos y de surfactantes naturales, principalmente asfaltenos, que como se mencionó antes, son capaces de estabilizar emulsiones W/O. El método de desestabilización a lo largo de un barrido de formulación, consiste en la adición de cantidades sucesivas de un surfactante hidrofílico (NPE - 6), referido en este trabajo como demulsificante. La dosificación a la que se verifica un mínimo en la persistencia de las emulsiones se denominará concentración de demulsificante óptima y se indica como C_D^* .

Es importante aclarar el empleo de los términos estabilidad y persistencia. La persistencia es una medida en escala de tiempo asociada al rompimiento de la película interfacial, por lo que rigurosamente posee sólo significado para la fase que se encuentra dispersa; sin embargo, esta medida se reporta respecto a la fase acuosa (t_w) y a la fase aceite (t_o) para todo el barrido de formulación, y se manejan en un sentido global de estabilidad de la emulsión como lo han hecho otros autores (Salager y col., 1982, Antón y col., 1986).

En la Figura 1 se muestra la influencia de la concentración de demulsificante sobre la persistencia de emulsiones preparadas con una fase aceite conteniendo 500 ppm de asfaltenos. Se verifica la ocurrencia de un mínimo en la estabilidad de las emulsiones, tanto si se considera la separación de la fase acuosa, según se ha demostrado anteriormente (Rondón y col., 2006, 2008), como también, si se considera la separación de la fase aceite. Además, de acuerdo a las medidas de conductividad reportadas en la Figura 1 esta situación fisicoquímica corresponde al punto de inversión en la morfología de las emulsiones. Antes del punto de inversión (cuando $C_D < C_D^*$) se obtienen emulsiones W/O para las que $t_w > t_o$, y el mayor efecto de

desestabilización se evidencia en la fase acuosa (basado en la variación de magnitud de la persistencia a lo largo del barrido). Al pasar más allá de la formulación óptima, (cuando $C_D > C_D^*$) esta tendencia se invierte, se obtienen emulsiones O/W para las que $t_w < t_o$ y la fase aceite obtiene un importante efecto de estabilización.

Al contrastar este comportamiento con la fenomenología de la (des)estabilización de emulsiones cuya fase aceite es un alcano (Salager y col. 1982, Antón y col., 1986), puede inferirse que la persistencia de la película interfacial en ambos sistemas responde de manera similar a cambios en la formulación fisicoquímica. No obstante, en los sistemas que contienen asfaltenos existe una diferencia importante en la magnitud de la persistencia de la fase aceite y de la fase acuosa a la formulación óptima, lo cual podría deberse a la importante diferencia de afinidades hidrofílica - lipofílica que existe entre el demulsificante empleado y los surfactantes naturales.

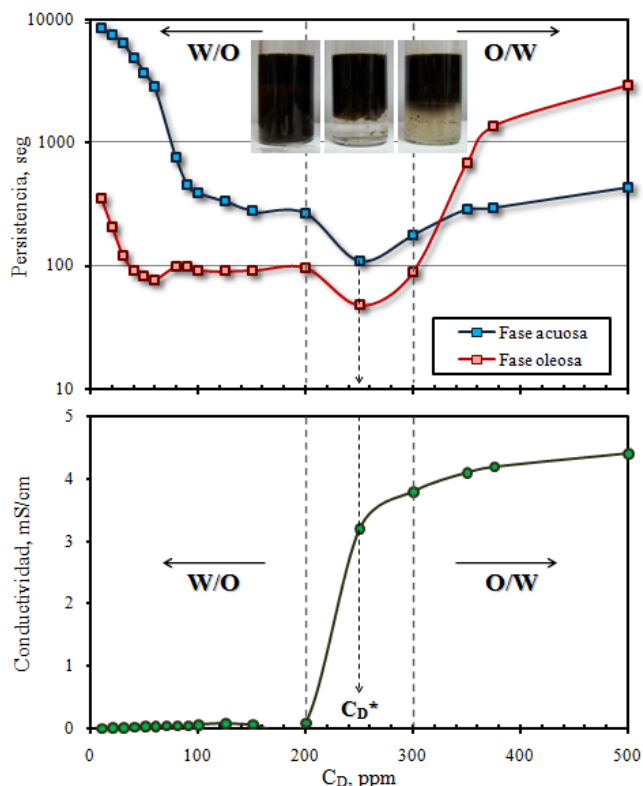


Figura 1. Influencia de la concentración de demulsificante (C_D) sobre la persistencia y la conductividad de emulsiones del sistema nonilfenoletoxilado de 6 EON/crudo venezolano de 8°API diluido en ciclohexano a 500 ppm de asfaltenos/fase acuosa (1% NaCl) a 30°C.

Influencia de la concentración de asfaltenos sobre la persistencia de emulsiones

El efecto de la concentración de asfaltenos (C_A) sobre la persistencia de las emulsiones se presenta en la Figura 2. Al incrementar C_A en el rango de 50 a 500 ppm, se observa que la concentración de demulsificante C_D^* resulta mayor. Resaltando los siguientes patrones fenomenológicos:

(i)^a Cuando $C_D \ll C_D^*$ el aumento en la persistencia de las emulsiones (evaluada a una misma C_D) obedece al efecto de la concentración de asfaltenos.

(ii) Cuando $C_D \gg C_D^*$ la concentración de asfaltenos no tiene efecto sobre la persistencia de las emulsiones.

^aLos signos $\gg$ / $\ll$ se emplean a fin de especificar concentraciones de demulsificante lo suficientemente lejos de la formulación óptima, para las cuales no existen efectos aleatorios de una película interfacial inestable que puedan interferir sobre la magnitud de la persistencia que se mide.

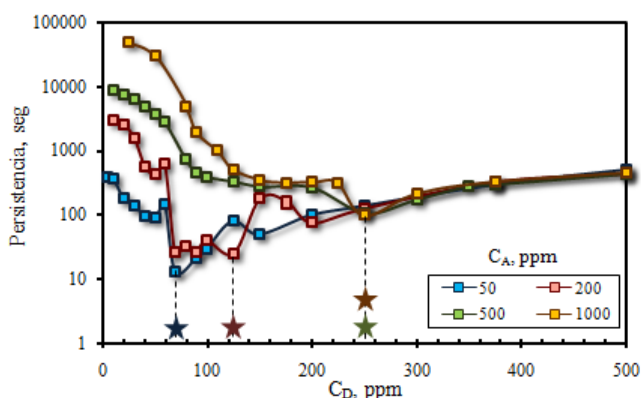


Figura 2. Efecto de la concentración de asfaltenos y demulsificante sobre la persistencia de las emulsiones del sistema nonilfenoletoxilado de 6 EON/crudo venezolano de 8°API diluido en ciclohexano de 50 a 1000 ppm de asfaltenos/fase acuosa (1% NaCl) a 30°C, (★) indica la concentración óptima de demulsificante C_D^* .

El comportamiento fisicoquímico descrito permite argumentar que para condiciones de $HLD > 0$ (donde $C_D < C_D^*$) la película interfacial es dominada por los surfactantes naturales (asfaltenos) presentes en el crudo, es decir, las emulsiones se encuentran estabilizadas por estas especies. Luego, para condiciones de $HLD < 0$ (donde $C_D > C_D^*$) el demulsificante es el que estabiliza la emulsión, ya que ha sido capaz de desestabilizar el efecto dominante de los asfaltenos, y de esta manera, el que preferentemente se adsorberá en la interfase debido a su mayor hidrofiliidad. Así, el sistema SOW se encuentra en una misma condición de formulación sin importar la concentración de asfaltenos.

Aplicaciones en deshidratación de emulsiones petroleras

En la desestabilización de emulsiones petroleras el mecanismo fisicoquímico de acción de los agentes demulsificantes se encuentra asociado a la consecución de la formulación óptima mediante la dosificación de la cantidad necesaria de un surfactante hidrofílico adecuado. Las observaciones descritas en las secciones anteriores corroboran la definición propuesta por Salager en 1990 para un modelo de agente deshidratante, al que se refiere como una especie capaz de desestabilizar la emulsión mediante su cambio a una morfología opuesta, es decir la que él puede estabilizar.

En la Figura 3 se representa en escala logarítmica la variación de C_D^* en función de C_A para el demulsificante estudiado. Se observa el lugar geométrico de mínimos de estabilidad de las emulsiones, compuesto por dos segmentos de línea recta que se interceptan en un punto que constituye un umbral, el cual se encuentra a 250 ppm de surfactante y 500 ppm de asfaltenos, denotado con la letra T (Threshold) y de coordenadas C_{AT} C_{DT} (Rondón y col., 2008, Pereira y col., 2011). Esta es la concentración mínima de surfactante necesaria para desestabilizar el sistema agua-crudo en aplicaciones industriales de deshidratación (Rondón y col., 2006). A concentraciones de asfaltenos superiores a este valor, C_D^* permanece constante en dos niveles: 250 ppm para el rango [500 - 2000] ppm de asfaltenos, y 190 ppm para el rango [2000 - 30000] ppm de asfaltenos.

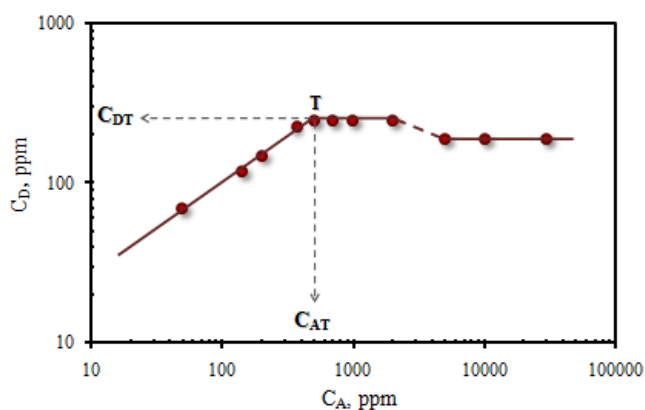


Figura 3. Lugar geométrico de mínimos de persistencia de las emulsiones del sistema nonilfenoletoxilado de 6 EON/crudo venezolano de 8°API diluido en ciclohexano/fase acuosa (1% NaCl) a 30°C.

A concentraciones de asfaltenos menores que C_{AT} , la variación $C_D^* - C_A$ es una recta de pendiente aproximadamente unitaria en escala log-log, lo que indica la existencia de una relación de proporcionalidad entre

ambas variables; denominándose este segmento *régimen proporcional* (Rondón y col., 2008). En el sistema nonilfenoletoxilado de 6 EON/crudo diluido en ciclohexano/fase acuosa (1% de NaCl) se verifica la existencia de este segmento; no obstante, la relación C_D^*/C_A no es exactamente constante ya que para aumentos sucesivos en la concentración de asfaltenos el incremento en la C_D^* se hace cada vez menor, es decir la pendiente es levemente inferior a la unidad.

En lo que se refiere al comportamiento del régimen constante se ha postulado que sólo una cantidad de los asfaltenos presentes en el sistema se encuentra como una mono-capa en la interfase. El resto de los asfaltenos podría estar en alguna forma de exceso, ya sea como agregados o como algún tipo de red tridimensional adjunta a la capa interfacial (Rondón y col., 2008; Álvarez y col. 2009; Pereira, 2009). La leve disminución del valor de C_D^* observada en esta investigación a valores de $C_A > 2000$ ppm se cree que podría deberse a efectos de segregación interfacial de los asfaltenos, y por lo tanto a un consecuente cambio del EACN en las inmediaciones de la mezcla interfacial, lo que produce un leve cambio en la ecuación (1) (Salager y col., 2016).

4 Conclusiones

Se encontró un patrón fenomenológico en la (des)estabilización de emulsiones cuya fase oleosa es una mezcla compleja de hidrocarburos que contiene asfaltenos. A condiciones de $HLD > 0$, (i) la persistencia de la fase acuosa es mayor a la persistencia de la fase oleosa, y (ii) la concentración de asfaltenos determina la persistencia de las emulsiones. A la formulación óptima ó $HLD=0$, (i) tanto la persistencia de la fase acuosa como de la fase oleosa alcanzan un mínimo, sin embargo (ii) existe una diferencia importante en su magnitud. A condiciones de $HLD < 0$, (i) la persistencia de la fase oleosa es mayor a la persistencia de la fase acuosa, y (ii) la concentración de asfaltenos no tiene efecto sobre la persistencia de las emulsiones. El comportamiento descrito demuestra que: (i) antes de la formulación óptima ($HLD > 0$) las emulsiones se encuentran estabilizadas por los asfaltenos, (ii) después de la formulación óptima ($HLD < 0$) es el demulsificante el que estabiliza las emulsiones, y (iii) fuera de la región de inversión el patrón fenomenológico en la persistencia de estas emulsiones es similar al observado en sistemas que contienen aceites simples.

Referencias

Alvarez G, Poteau S, Argillier J, Langevin D, Salager J L, 2009, Heavy Oil-Water Interfacial Properties and Emulsion Stability: Influence of Dilution. Energy & Fuels, 23, 294–299.

Antón RE, Salager JL, 1986, Emulsion instability in the three-phase behavior region of surfactant-alcohol-oil-brine systems. *J. Colloid Interface Sci.*, 111(1), 54-59.

Bourrel, M., Salager JL, Schechter R, Wade W, 1980, A Correlation for Phase Behavior of Nonionic Surfactants, *J. Colloid Interface Sci.*, 75(2), 451-461.

Delgado-Linares JG, Pereira JC, Rondón M, Bullón J, Salager JL, 2016, Breaking of Water-in-Crude Oil Emulsions. 6. Estimating the Demulsifier Performance at Optimum Formulation from both the required dose and the attained instability. *Energy & Fuels*, 30(7), 5483-5491.

Kilpatrick PK, 2012, Water-in-crude oil emulsion stabilization: Review and unanswered questions. *Energy&Fuels*, 26(7), 4017-4026.

Pereira JC, 2009, Fenómenos de Ruptura e Inversión de Emulsiones: Aspectos Físicoquímicos y Cinéticos. Tesis Doctoral en Ciencias Aplicadas, Universidad de Los Andes, Venezuela.

Pereira JC, Delgado-Linares J, Scorzza C, Rondón M, Rodriguez S, Salager JL, 2011, Breaking of water-in-crude oil emulsions. 4. Estimation of the demulsifier surfactant performance to destabilize the asphaltene effect. *Energy & Fuels*, 25(3), 1045-1050.

Rondón M, Bouriat P, Lachaise J, Salager JL, 2006, Breaking of Water-in Crude Oil Emulsions. 1. Physicochemical Phenomenology of Demulsifier Action, *Energy & Fuels*, 20(4), 1600 – 1604.

Rondón M, Pereira JC, Bouriat P, Graciaa A, Lachaise J, Salager JL, 2008, Breaking of Water-in-Crude Oil Emulsions. 2. Influence of Asphaltene Concentration and Diluent Nature on Demulsifier Action, *Energy & Fuels*, 22(2), 702-707.

Salager JL, Morgan J, Shechter R, Wade W, Vasquez E, 1979, Optimum Formulation of Surfactant/Water/Oil Systems for Minimum Interfacial Tension and Phase Behavior, *Soc. Petrol. Eng. J.*, 19(2), 107-115.

Salager JL, Loaiza-Maldonado I, Minana-Perez M, Silva F, 1982, Surfactant-oil-water systems near the affinity inversion part I: relationship between equilibrium phase behavior and emulsion type and stability. *J. Dispersion Science and Technology*, 3(3), 279-292.

Salager J L, 1990, The Fundamental Basis for the Action of a Chemical Dehydrant: Influence of the Physical and Chemical Formulation on the Stability of an Emulsion. *Intern. Chem. Eng.*, 30, 103 – 116.

Salager JL, 1999, Microemulsions. En *Handbook of Detergents - Part A: Properties*, G. Broze Ed., Marcel Dekker, New York, Cap. 8, pp 253-302.

Salager JL, Antón R, Andérez J, Aubry J, 2001, Formulation des microémulsions par la méthode du HLD, *Traité de Génie des Procédés*. Cap. J2-157, Techniques de l'ingénieur, Francia.

Salager JL, Moreno N, Antón R, Marfisi S, 2002, Apparent Equilibration Time Required for a Surfactant-Oil-Water System to Emulsify into the Morphology Imposed by the Formulation, *Langmuir*, 18, 607–611.

Salager JL, Bullón J, Pizzino A, Rondón - Gonzalez M, Tolosa L, 2010, Emulsion Formulation Engineering for the Practitioner. *Encyclopedia of Surface Colloid Science*, 1, 1: 1-6. P. Somasundaran Ed., Taylor & Francis, London.

Salager JL; Forgiarini A; Bullón J, 2013, How to Attain Ultralow Interfacial Tension and Three-Phase Behavior with Surfactant Formulation for Enhanced Oil Recovery: A review. Part 1. Optimum Formulation for Simple Surfactant–Oil–Water Ternary Systems. *J. Surfact. Deterg.*, 16: 449–472.

Salager JL, Forgiarini AM, Delgado JG, 2016, HLD optimum formulation as the main principle for breaking emulsions. Recent advances on the demulsifier performance in crude oil dewatering. 107th AOCS Annual Meeting, Salt Lake City, May 1-4, 2016.

Jesús Fernández: es estudiante de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes (Mérida-Venezuela), actualmente está cursando el 10º semestre del pensum de estudios. Se encuentra realizando el proyecto de grado titulado *Influencia de la formulación y del WOR sobre la estabilidad y la tensión interfacial de sistemas surfactante-aceite-agua conteniendo asfaltenos en el Laboratorio FIRP*. Correo electrónico: jesusd411@gmail.com

Ronald Márquez: es Ingeniero Químico de la Universidad de Los Andes (Mérida-Venezuela) y actualmente se encuentra realizando estudios Doctorales en el área de *Reología Interfacial en aplicaciones de Deshidratación de crudo y Recuperación Mejorada de Petróleo*. Es profesor adscrito a la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes e investigador del Laboratorio FIRP desde hace más de 10 años. Correo electrónico: marquezronald@ula.ve

José Delgado-Linares: es Ingeniero Químico con un M.Sc en Ingeniería Química en la Universidad de Los Andes (Mérida-Venezuela) y Doctor en Ciencias Aplicadas en la misma universidad. Fue investigador visitante en el Instituto Francés del Petróleo (Rueil - Francia) y Postdoctorado en el Center for Hydrate Research, Colorado School of Mines (Golden-EE.UU). Actualmente es Profesor adscrito a la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes e investigador del Laboratorio FIRP en el área de deshidratación de petróleo y comportamiento interfacial de los asfaltenos. Correo electrónico: josegdel@gmail.com

Jean Louis Salager: es Licenciado en Química e Ingeniero de Industrias Químicas ENSIC – Universidad de Nancy – Francia, así como MSc, PhD y Postdoc de la Universidad de Texas en Austin EE.UU. Es fundador y profesor de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes (Mérida-Venezuela) desde 1970. En 1978 fue fundador del Laboratorio FIRP, donde ha investigado en la

formulación de sistemas surfactante-agua-aceite para diversas aplicaciones. Correo electrónico: _salager@ula.ve

Ana Forgiarini: es Ingeniero Químico con M.Sc en Ingeniería Química en la Universidad de Los Andes (Mérida-Venezuela). Recibió su Ph.D. de la Universidad de Barcelona (España) y permaneció durante un año como investigador postdoctoral en la Universidad de Carolina del Norte (EE.UU). Es actualmente Director adjunto del Laboratorio FIRP, y jefe del grupo de investigación y desarrollo de micro y nanoemulsiones, particularmente con aplicaciones en producción de petróleo.

Capítulo 45

Estudio de compensación reactiva para el sistema de potencia occidental de Corpoelec

Zerpa, Ivana; Muñoz, Juan*; Mora, Ernesto; Ballester, Lelis.

Departamento de Potencia. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Los Andes,
Merida, Venezuela.

*munozej@ula.ve

Resumen

El sistema eléctrico occidental venezolano presenta interrupciones en el servicio que son en su mayor parte originadas por inestabilidad de tensión en las subestaciones que conforman el sistema, cuya causa principal es el alto consumo de reactivos en el mismo; por lo tanto, en este trabajo se realiza un estudio de compensación de potencia reactiva usando compensadores estáticos de var para ajustar los niveles de tensión a valores de operación aceptables, y mejorar la estabilidad de voltaje del sistema. Para llevar a cabo este estudio, se modela el sistema eléctrico occidental de Venezuela, considerando mediciones de campo para una adecuada y precisa sintonización del modelo usado en las simulaciones. La metodología aplicada para determinar la ubicación y dimensionamiento de la compensación, además de analizar su efecto en los márgenes de estabilidad, está basada en métodos estáticos de estabilidad de voltaje, y novedosos índices de seguridad que determinan la proximidad del sistema al colapso de voltaje. Los resultados obtenidos demuestran que, mediante la compensación de potencia reactiva propuesta, los niveles de tensión en las subestaciones del sistema eléctrico occidental permanecen en un rango de operación adecuado, y los márgenes de estabilidad de voltaje mejoran considerablemente.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

Uno de los problemas más frecuentes en el sistema de potencia occidental está asociado a la inestabilidad en los niveles de tensión, trayendo como consecuencia racionamientos del servicio o cortes inesperados de energía. Una de las alternativas comúnmente utilizadas para mejorar el perfil de voltaje y la estabilidad de tensión en los sistemas de potencia está basada en la compensación de potencia reactiva (Sunita y col, 2010).

En virtud de ello, la adecuada ubicación y dimensionamiento de los dispositivos de compensación pueden garantizar una mejoría considerable en los perfiles de tensión y una reducción en las pérdidas del sistema. En este sentido, en este trabajo de investigación se realiza un estudio del sistema eléctrico occidental venezolano con el objetivo de proponer la ubicación y dimensionamiento más apropiados de compensadores de potencia reactiva basados en compensadores estáticos de Vars o (SVC) por sus siglas en inglés. Para lograr este objetivo, se modela la red occidental usando para ello una exhaustiva recopilación y análisis de la data de dicho sistema, específicamente del perfil tensiones en las principales subestaciones y las potencias netas inyectadas activas y reactivas. Para el análisis de los márgenes de estabilidad de voltaje del sistema, se utilizan curvas PV y estudios de sensibilidad, además de los índices de seguridad denotados como LVSI (Indicador de Estabilidad de Tensión Lineal, por sus siglas en inglés) y el IVSI (Indicador de estabilidad de tensión integrada, por su siglas en inglés), los cuales permiten determinar el punto de colapso de voltaje de cualquier sistema de potencia, de una forma eficiente.

2 Marco Teórico

2.1 Estabilidad de Voltaje

La estabilidad de voltaje se refiere a la habilidad de un sistema de potencia de mantener un perfil de tensiones aceptables en condiciones normales de funcionamiento y cuando el sistema presenta una falla. Existen diversos métodos para determinar el margen de estabilidad de voltaje, entre ellos se tienen las simulaciones en el dominio del tiempo, en donde el conjunto de ecuaciones diferenciales-algebraicas que modelan al sistema de potencia son resueltas para analizar, por ejemplo, la interacción de los esquemas de control y su influencia en la estabilidad de voltaje ante contingencias.

Alternativamente, métodos de análisis basados en flujos de carga tales como las curvas PV pueden ser utilizados para evaluar la cargabilidad máxima del sistema antes de alcanzar el punto de colapso debido a una bifurcación del tipo silla-nodo, o debido a una bifurcación de tipo limite, en donde el punto máximo de carga es debido a un límite de potencia reactiva alcanzado por ejemplo, por un generador

sincrónico. Métodos basados en la linealización de las ecuaciones diferenciales-algebraicas tales como en el análisis de autovalores es otra estrategia comúnmente utilizada para identificar estos tipos de bifurcaciones.

En este trabajo de investigación se utilizan curvas PV y estudios de sensibilidad, además de los índices de seguridad denotados como LVSI (Indicador de Estabilidad de Tensión Lineal, por sus siglas en inglés) y el IVSI (Indicador de estabilidad de tensión integrada, por su siglas en inglés). Estos índices están basados en un esquema eficiente de reducción de barras que se describe a continuación:

▪ Equivalente de Red de 2 Barras

Se asume un equivalente de red de dos barras, en donde la barra extrema, emisor, se asume como una barra generadora y el extremo receptor como una barra de carga conectada por una impedancia de línea, lo que representa el equivalente de toda la red multibarras como se muestra en la Fig. 1. (Chakraborty y col, 2011).

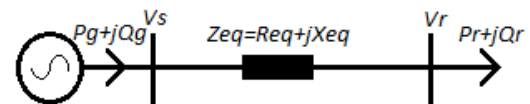


Fig. 1: Equivalente del Sistema de dos barras (Chakraborty y col, 2011).

Las pérdidas de potencia activa y pérdidas de potencia reactiva del equivalente de red de 2 barras se pueden expresar como (Chakraborty y col., 2011):

$$P_{\text{Pérdidas}} = \frac{R_{eq}(P_g^2 + Q_g^2)}{V_s^2} \quad (1)$$

$$Q_{\text{Pérdidas}} = \frac{X_{eq}(P_g^2 + Q_g^2)}{V_s^2} \quad (2)$$

Considerando el principio básico de la conversión de energía, se tiene:

$$\sum P_{\text{Pérdidas}} = \sum P_g - \sum P_r \quad (3)$$

$$\sum Q_{\text{Pérdidas}} = \sum Q_g - \sum Q_r \quad (4)$$

Si una red multibarras se convierte en un sistema equivalente de 2 barras, se debe cumplir:

$$\sum P_r (\text{para un sistema de multibarras}) = P_r (\text{para un sistema equiv. de dos barras}) \quad (5)$$

$$\sum Q_r (\text{para un sistema de multibarras}) = Q_r (\text{para un sistema equiv. de dos barras}) \quad (6)$$

Para la red equivalente de 2 barras, se tiene:

$$R_{eq} = \frac{P_g - P_r}{\frac{(P_g^2 + Q_g^2)}{V_s^2}} = \frac{P_g - P_r}{(P_g^2 + Q_g^2)} \quad (7)$$

$$X_{eq} = \frac{Q_g - Q_r}{\frac{(P_g^2 + Q_g^2)}{V_s^2}} = \frac{Q_g - Q_r}{(P_g^2 + Q_g^2)} \quad (8)$$

En este caso, la magnitud de la tensión de la barra extremo emisor V_s se supone que tiene un valor nominal de 1,0 p.u. La Z_{eq} , impedancia de línea equivalente está dada por:

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (9)$$

Por lo tanto:

La expresión anterior permite el cálculo de la tensión de barra del extremo receptor. Así, el sistema de dos barras desarrollado anteriormente representa el modelo equivalente de una red de múltiples barras en cualquier configuración de red particular y de carga. (Sunita y col., 2010, Chakraborty y col., 2011, 2015).

▪ Indicador de Estabilidad de Tensión Lineal (LVSI)

El modelo de dos barras de la Fig. 1 se puede representar en forma equivalente de acuerdo a la Fig. 2. En esta figura $Z_s \angle \theta$ es la impedancia de la línea, $Z_r \angle \phi$ es la impedancia de carga, cuyo ángulo es $\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Q_r}{P_r} \right)$, E es la tensión del extremo emisor, y V_r es la tensión del extremo receptor.

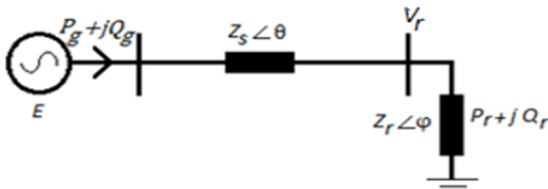


Fig. 2: Línea de Transmisión modelo con su parámetro. (Chakraborty y col., 2015, El-Kateb y col., 1997).

El indicador LVSI puede ser escrito como:

$$LVSI = \frac{\sin(\theta) \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4P_r R_{eq}}{E^2}} \right) + \cos(\theta) \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4Q_r X_{eq}}{E^2}} \right)}{\sin(\theta) + \cos(\theta) - 1} \quad (11)$$

Usando el LVSI, se puede estimar la cercanía al punto colapso de tensión del sistema en una forma rápida, porque el LVSI aumenta linealmente con el aumento de la carga. Por lo tanto, el colapso de tensión se producirá cuando LVSI se aproxima a la unidad. (Chakraborty y col., 2015).

▪ Indicador de Estabilidad de Tensión Integrada (IVSI)

La potencia en el extremo receptor se puede escribir en función del incremento de carga como: $n = \frac{Z_s}{Z_r}$:

$$P_r = \frac{E^2 / Z_s}{n \left[1 + \left(\frac{1}{n} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{n} \right) \cos(\theta - \phi) \right]} \cos \phi \quad (12)$$

$$Q_r = \frac{E^2 / Z_s}{n \left[1 + \left(\frac{1}{n} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{n} \right) \cos(\theta - \phi) \right]} \sin \phi \quad (13)$$

Por su parte, las pérdidas en la línea de transmisión vienen dadas por:

$$P_l = \frac{E^2 / Z_s}{\left[1 + \left(\frac{1}{n} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{n} \right) \cos(\theta - \phi) \right]} \cos \phi \quad (14)$$

$$Q_l = \frac{E^2 / Z_s}{\left[1 + \left(\frac{1}{n} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{n} \right) \cos(\theta - \phi) \right]} \sin \phi \quad (15)$$

La potencia máxima real transferida al extremo receptor, se puede obtener usando la condición límite $\frac{dP_r}{dQ_r} = 0$ que conduce a $\eta = 1$. Sustituyendo esto en la ecuación (12), se obtiene:

$$P_{R(MAX)} = \frac{E^2 \cos \phi}{Z_s 4 \cos^2 \frac{(\theta - \phi)}{2}} \quad (16)$$

La potencia reactiva máxima transferible, la máxima pérdida de potencia activa y la máxima pérdida de potencia reactiva en la línea, se pueden obtener de manera similar como:

$$Q_{R(MAX)} = \frac{E^2 \sin \phi}{Z_s 4 \cos^2 \frac{(\theta - \phi)}{2}} \quad (17)$$

$$P_{l(MAX)} = \frac{E^2 \cos \theta}{Z_s 4 \cos^2 \frac{(\theta - \phi)}{2}} \quad (18)$$

$$Q_{l(MAX)} = \frac{E^2 \sin \theta}{Z_s 4 \cos^2 \frac{(\theta - \phi)}{2}} \quad (19)$$

En base a estas cantidades máximas permisibles, se propuso la expresión del indicador IVSI como:

$$IVSI(P) = \frac{P_r}{P_{R(MAX)}} = \frac{Q_r}{Q_{R(MAX)}} \quad (20)$$

$$IVSI(L) = \frac{P_l}{P_{l(MAX)}} = \frac{Q_l}{Q_{l(MAX)}} \quad (21)$$

Por consiguiente, los valores de P_R , Q_R , P_L y Q_L se obtienen a partir del cálculo del flujo de potencia convencional. Es evidente que a partir de las ecuaciones (20) y (21) el indicador IVSI integra las potencias y las pérdidas para así calcular un indicador de estabilidad de voltaje único. (Sunita y col., 2010, Chakraborty y col., 2011, Chakraborty y col., 2015, El-Kateb y col., 1997).

▪ Modelo equivalente de Thévenin de dos Barras

Existen diversos métodos para calcular los parámetros del equivalente de Thévenin. En este artículo, el método utilizado para determinar los parámetros del equivalente de Thévenin está basado en el modelo de potencia y la información del flujo de carga en dos casos base, uno sin carga y el otro con carga normal en la barra más débil (Vu y col., 1997). La Fig. 3 muestra en forma compacta un sistema de potencia general, y la Fig. 4 muestra su respectivo equivalente de Thevenin de dos barras.

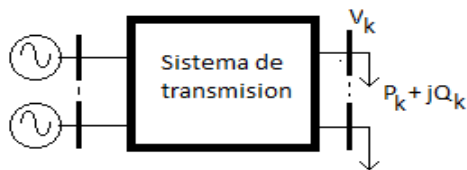


Fig. 3: Sistema Original(Nguyen y col., 2012).

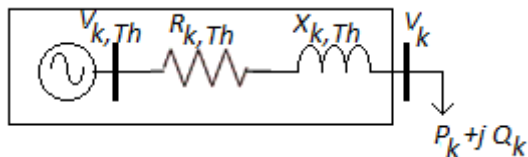


Fig.4: Sistema equivalente de Thévenin visto de la barra más débil (barra k)(Nguyen y col., 2012).

En este equivalente, la barra más crítica del sistema original se mantiene intacta, pero el resto del sistema se sustituye por el equivalente de Thévenin. El voltaje de Thévenin es la tensión en la barra más débil obtenido por la solución del flujo de potencia en el caso sin carga en esa barra(Nguyen y col., 2012). Por lo tanto:

$$V_{k,Th} = V_k^0 \quad (22)$$

La impedancia de Thévenin depende de las condiciones de operación y se puede calcular de la siguiente manera:

$$R_{k,Th} = \frac{V_k \cdot V_k^0 \cdot S_k \cdot \cos(\delta^0 - \delta + \phi) - V_k^2 \cdot P_k}{P_k^2 + Q_k^2} \quad (23)$$

$$X_{k,Th} = \frac{V_k \cdot V_k^0 \cdot S_k \cdot \sin(\delta^0 - \delta + \phi) - V_k^2 \cdot Q_k}{P_k^2 + Q_k^2} \quad (24)$$

Dónde:

$S_k \angle \phi = P_k + jQ_k$ es la carga en la barra k

$V_k^0 \angle \delta^0$ es la tensión en circuito abierto en la barra k

$V_k \angle \delta$ es la tensión en la barra k cuando se conecta la carga $P_k + jQ_k$

$V_k \angle \delta$ Es obtenido mediante el cálculo del flujo de carga en el caso de que la carga $P_k + jQ_k$ este conectada a la barra k. Por lo tanto, la impedancia Thevenin es una función de las condiciones de carga y del sistema. (Vu y col., 1997, Nguyen y col., 2012).

2.2 Compensación de Potencia Reactiva

Para la compensación de Potencia Reactiva en este sistema se utilizó el compensador estático SVC, del tipo FC-TCR mostrado en la Fig.5.

▪ Compensador Estático de Vars (SVC)

Los compensadores estáticos de Vars, conocido también por sus siglas en inglés Static Var Compensator (SVC), son generadores o cargas estáticos conectados en forma shunt cuya salida es variada por el control específico de parámetros del sistema de potencia. Por lo tanto, un SVC consiste de un generador estático de Var y un dispositivo de control apropiado. Los SVC son dispositivos rápidos, que actúan normalmente durante varios ciclos. El significativo costo de un SVC se justifica cuando se requiere rapidez de acción para la mejora de la estabilidad. (Chakraborty y col., 2015, Gonzalez 2004).

▪ Modelado de los SVC

Los Reactores controlados por tiristores (Thyristorcontrolled Reactor TCR) SVC están representados por la tensión V_{SVC} detrás de una reactancia fija X_s . La magnitud de V_{SVC} es controlada por el controlador del SVC. Dado que es un generador de potencia reactiva puro, SVC del modelo está siempre en fase con la tensión terminal V_R y viene dada por:

$$V_{SVC} = V_R \left(\frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi} - 1 \right) \quad (25)$$

La magnitud de la susceptancia del SVC (B_{SVC}) es una función del ángulo de disparo α y se obtiene como:

$$B_{SVC} = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi X_s} - 1 \quad \text{para } \frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi \quad (26)$$

Por lo tanto B_{SVC} es controlado usando SVC en cualquier nodo de la red de energía. Además, se tiene:

$$Q_{SVC} = V_{SVC}^2 B_{SVC} \quad (27)$$

El modelo de SVC implementado en el presente trabajo es el que se muestra en la Fig. 5, es del tipo FC-TCR

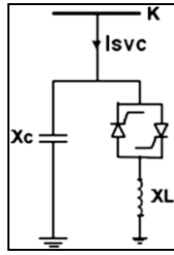


Fig. 5: Modelo del SVC / FC-TCR (Chakraborty y Chakraborti, 2015)

Este modelo está compuesto de un reactor controlado por tiristores y una susceptancia capacitiva fija, que está conectada en paralelo. El equivalente de la susceptancia B_{SVC} de este modelo es una función de la variación del ángulo de disparo (α) de los tiristores. Este modelo ofrece información sobre el ángulo de disparo SVC requerido para lograr un buen nivel de compensación.

La ecuación (26) representa la susceptancia B_{SVC} del actual modelo. La Fig. 6 representa la susceptancia equivalente B_{SVC} de este modelo en función del ángulo de disparo de los tiristores. Se puede notar que la naturaleza de esta característica es continua y suave en ambas áreas operativas.

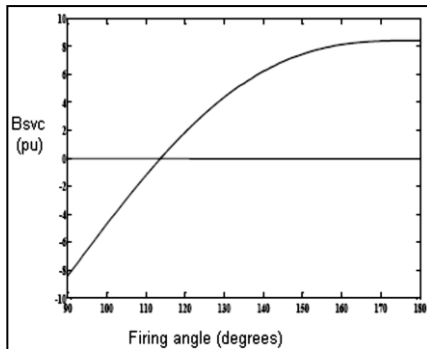


Fig.6: SVC perfil susceptancia equivalente (Zabaoui y col., 2013).

El desempeño del SVC puede ser visualizado en la gráfica del voltaje AC controlado de la barra (V) dibujado en función de la corriente reactiva SVC (I_s). La característica V/I de un SVC ideal es mostrada en la Fig. 7. Esta representa la característica de régimen permanente y de régimen cuasi-permanente del SVC.

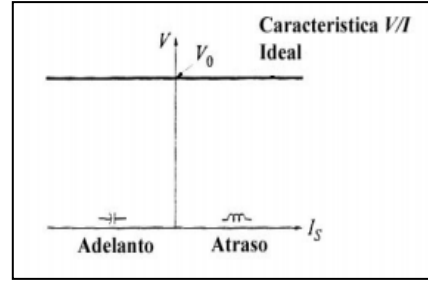


Fig. 7: Característica V/I Ideal de un SVC (Rashid, 2004).

Con la intención de examinar cómo se comporta el SVC cuando es aplicado a un sistema de potencia, se puede determinar la característica V/I considerando el circuito equivalente de Thevenin visto desde la barra cuyo voltaje será regulado por el SVC. Esto se ilustra en la Fig. 8.

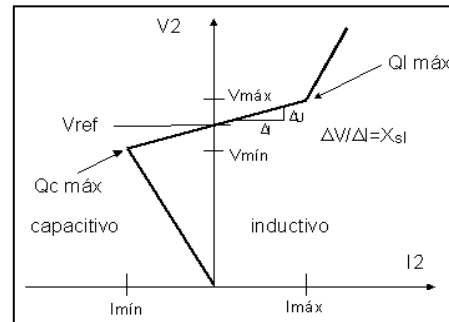


Fig. 8: Curva Característica del SVC (Rashid, 2004).

2.3 Prevención de la Inestabilidad de Voltaje

El voltaje en una barra de carga alimentada por una línea de transmisión depende de la magnitud de la carga, el factor de potencia de la carga y la impedancia de la LT.

En este sentido la Fig.9.b, muestra el perfil de voltaje de una barra de carga mientras que la Fig. 9. a, muestra que la carga tiene un factor de potencia variable y la línea de transmisión es considerada sin pérdidas.

En el sistema típico mostrado en la Fig. 9, puede observarse que si el factor de potencia combinado de la carga y el SVC puede ser controlado apropiadamente a través de la potencia reactiva suministrada por el SVC, el voltaje en el extremo receptor puede ser mantenido constante al incrementar la magnitud de la potencia transmitida evitando, de esta manera, la inestabilidad de voltaje en el sistema de potencia.

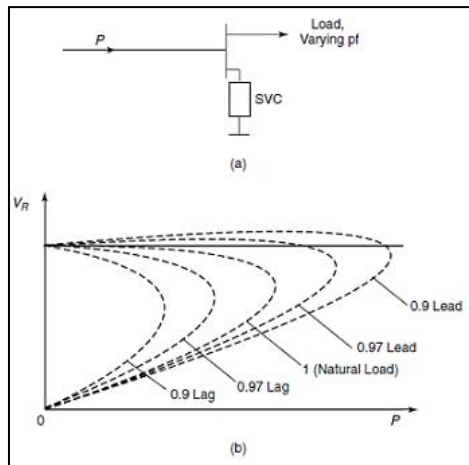


Fig. 9 (a) Un SVC conectado a una barra de carga, alimentada por una L.T. (b) Perfil de tensiones en el extremo receptor de la L.T. cargada con una carga con una carga con f.p. variable.

3 Procedimiento Experimental

Sistema Occidental de CORPOELEC

En la Fig. 10, se observa el sistema de Transmisión Occidente, el mismo, posee conexión con el resto del sistema nacional a través de las subestaciones Morochas II, Acari-gua II, Guanare, Las Flores y Mene Grande.

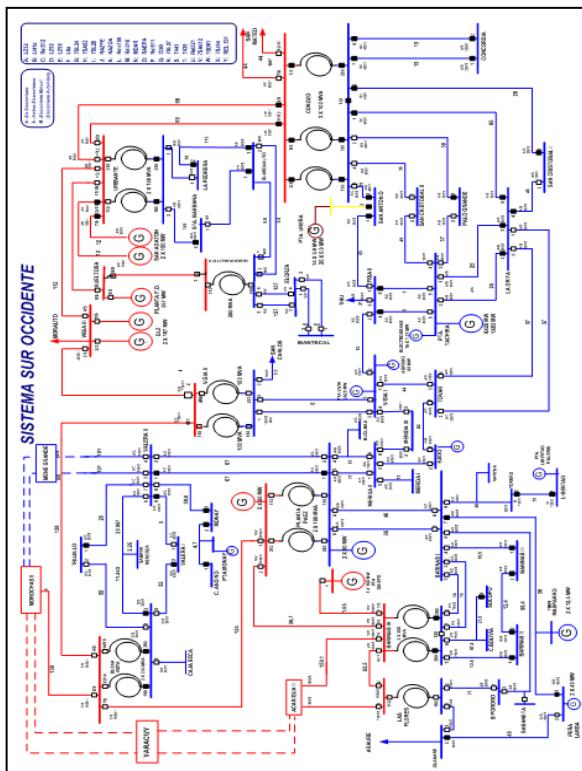


Fig. 10: Sistema de Transmisión Sur Occidental (CORPOELEC, 2015)

4 Resultados Y Discusión

■ Equivalente de Red de Dos Barras

Para el cálculo de este índice se obtuvo un equivalente de dos barras para el Sistema Occidental. Del flujo de carga obtenido por NEPLAN® y asumiendo un $V_S = 1\angle 0$ se tiene

Tabla 1: Datos obtenidos por NEPLAN®

P_g (MW)	Q_g (MVar)	P_{carga} (MW)	Q_{carga} (MVar)	$P_{perdidas}$ (MW)	$Q_{perdidas}$ (MVar)
1393,9	224,328	1349,959	471,663	43,941	13,364

De las ecuaciones (7) y (8) se tiene:

$$R_{eq} = 0,000022 \Omega$$

$$X_{eq} = -0,000124 \Omega$$

Por lo tanto tenemos una

$$Z_{eq} = 0,000022 - 0,000124 * j$$

$$Z_{eq} = 0,000126\angle -76,946 (\Omega)$$

Y utilizando la ecuación (10) se obtiene un

$$V_R = 1,01291\angle 10,1137 (V)$$

■ Indicador de estabilidad de tensión lineal (LVSI) para el Sistema Occidental

Para el uso de este indicador o índice de estabilidad se utiliza el modelo equivalente de red de dos barras ya descrito y calculado anteriormente. Es bueno recordar que para el análisis de este indicador, el colapso de tensión se producirá cuando el LVSI se aproxime a la unidad.

Para el cálculo del índice LVSI se utilizaron los valores de Z_{eq} y V_R obtenidos en la sección anterior, además, utilizando la ecuación (11), se obtuvo:

$$LVSI_{CASO BASE} = 0,044024$$

Teniendo en cuenta la configuración base del sistema y la clasificación de las barras, se calculó este índice aumentando el 5% de la carga reactiva del valor base de cada barra y para así calcular un LVSI para cada barra.

Los resultados de la clasificación de estabilidad para las barras más débiles del sistema obtenidos utilizando este método (LVSI) se presentan en la Tabla 2 y se puede ver su comportamiento en la Fig. 11.

De los resultados obtenidos para este indicador, podemos decir que para el caso, sin hacer la variación de carga en las barras más débiles, el sistema está más próximo al colapso de tensión ya que es el LVSI que se aproxima más a la unidad.

Por otro lado, según la clasificación de las barras, el LVSI que se aproxima a la unidad y estaría más cercano al punto de colapso es el de la barra menos débil Elorza. Cabe desta-

car que los valores obtenidos son muy cercanos y sus diferencias son muy pequeñas.

Tabla 2: Clasificación de las barras y su respectivo Índice LVSI

Barra	LVSI
Barra mucho más débil= Mantecal	0,042252
Barra más débil= Libertad	0,043982
Barra menos débil= Elorza	0,044042
Equiv. 2 Barras= Caso Base	0,044024

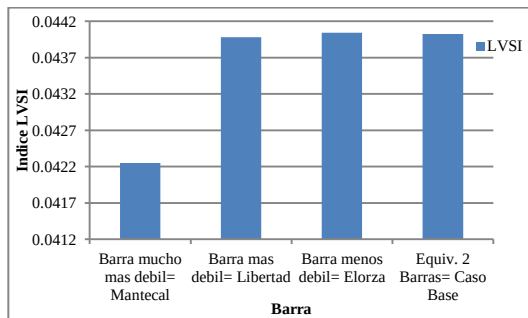


Fig.11: Comportamiento de las barras según su clasificación y el LVSI.

▪ Indicador de estabilidad de tensión integrada (IVSI)
Este índice se realizó para el Sistema Occidental, ya que se necesita el equivalente de dos barras visto desde la barra más débil en este caso la subestación Mantecal.

Con los datos obtenidos en el flujo de carga dado por NEPLAN® se toma en cuenta tanto la carga que está conectada en la barra más débil como el voltaje de la barra conectada como alimentación a esta barra. Por lo tanto. Se tiene:

$$P_R = 9,102 \text{ MW}$$

$$Q_R = 3,833 \text{ MVar}$$

Del cual se puede obtener un

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{3,833}{9,102} \right) = 22,8367^\circ$$

Además, se tiene una:

$$Z_{s=} 0,06055 + 0,24795 * j = 0,255236 \Omega \angle 76,2768^\circ$$

Por lo tanto, usando las ecuaciones (16) y (17) se obtiene, respectivamente:

$$P_{Rmax} = 16288,8 \text{ MW}$$

$$Q_{Rmax} = 6859,48 \text{ MVAR}$$

Con estos resultados, se obtiene un valor del IVSI, usando la ecuación (20)

$$IVSI(P) = 0,00059$$

Utilizando el método de equivalente de Thévenin para un sistema de dos barras y haciendo una adaptación a este índice, se puede tener gracias al flujo de carga, un equivalente para la barra más crítica del sistema original.

Por lo tanto, para la barra más débil con carga se tiene:

Tabla 3: Parámetros eléctricos de la barra más débil

V_k (kV)	δ (°)	P_k (MW)	Q_k (MVar)	$S_k \angle \phi$
119,593	9,58	9,102	3,833	9,876 $\angle$ 22,84

Y para la barra más débil sin carga se tiene:

$$V_{k,TH} = V_k^0 = 124,329 \text{ kV}$$

$$\delta^0 = 5,51$$

De las ecuaciones (23) y (24) se obtienen, respectivamente:

$$R_{k,TH} = 90,8271 \Omega$$

$$X_{k,TH} = -77,6966 \Omega$$

De esta manera, se tiene una

$$Z_{k,TH} = 90,8271 - 77,6966 * j$$

$$= 78,3156 \angle -82,7915$$

También se puede obtener la impedancia aparente:

$$Z_{APP} = \frac{119,593^2}{9,102 - 3,833 * j} = 1448,19 \Omega \angle 22,8367^\circ$$

Para hacer esta adaptación de impedancias con respecto al índice IVSI, se siguió variando la potencia activa dejando fija la potencia reactiva de carga, obteniendo los datos plasmados en la Tabla 4.

Tabla 4: Verificación del método IVSI usando la adaptación de la impedancia de Thévenin e impedancia aparente

POT. AC-TIVA (MW)	IVSI (P)	ZTH	ZAPP
19,102	0,001022	121,709	701,0002
29,102	0,001551	122,032	437,593
39,102	0,002178	121	300,834
49,102	0,002998	119,468	211,765
56,102	0,003858	125,182	160,048
57,102	0,004028	117,216	152,494
58,102	0,004222	116,784	144,624
59,102	0,004452	116,284	136,196

Con la Tabla 4 se construyó las Fig. 12 y la Fig. 13, en las cuales se indican que para una $P = 59,102$ MW ocurre el colapso de voltaje, ya que es la potencia que está más próxima para la unión de las impedancias y es donde el IVSI está más cerca de la unidad.

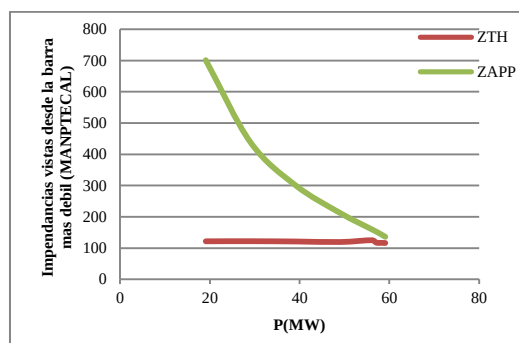


Fig. 12: Impedancias vistas desde la barra más débil usando la adaptación de la impedancia de Thévenin e impedancia aparente.

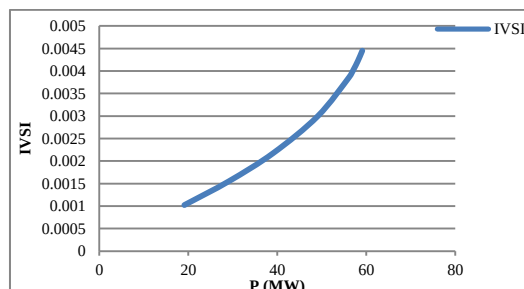


Fig. 13: Verificación del método IVSI usando la adaptación de la impedancia de Thevenin e impedancia aparente.

- Compensación del Sistema Occidental de CORPO-ELEC usando SVC

Luego de realizar todos los análisis de estabilidad previos a través de las técnicas mencionadas, se realizó la compensación de potencia reactiva en aquellas barras más débiles según los estudios anteriores, las cuales resultaron ser: Elorza, Cemento Andino, Trujillo, Mérida I y Vigía.

Compensando todos estos nodos simultáneamente, se logró mejorar de manera importante el perfil de tensiones correspondientes a los niveles de tensión a 230, 115, 34.5 y 13.8 kV, tal como se observa en las Fig. 13, 14 y 15, donde se puede ver que las tensiones en la mayoría de las barras se encuentran en el rango normalizado, comprendido entre un 95% y 105 % de la tensión nominal (0.95pu-1.05pu), esto nos indica que estaríamos contando con un Sistema Occidental estable, es decir, operando en forma segura.

Las barras antes mencionadas fueron compensadas mediante el uso de compensadores estáticos SVC, los cuales trabajan con un controlador de voltaje variando los Var en

un rango respectivo. Los datos utilizados en NEPLAN® para dimensionar cada SVC son los indicados en la Tabla 5, los cuales tienen como parámetros un voltaje de referencia el cual fue asignado, una reactancia, la cual es la pendiente de la curva característica del SVC, una potencia reactiva en términos de capacitancia ($Q_{C\ MAX}$) y una potencia reactiva en términos de inductancia ($Q_{L\ MAX}$), en los rangos de la potencia reactiva ($Q_{C\ MAX} - Q_{L\ MAX}$) se debe encontrar el valor de MVAR requeridos para un 100% de la tensión. Estos parámetros fueron determinados a partir de las curvas Q-V obtenidas para las barras antes mencionadas.

Tabla 5: Parámetros usados en NEPLAN® para los SVC

S/E	V _{REFERENCIA} %	X _{REFERENCIA} %	Q _C MAX	Q _L MAX
Libertad	100	50	15	35
Mantecal	100	50	5	15
Elorza	100	50	0	18
C. Andino	100	50	35	55
Trujillo	100	50	26	48
Mérida I	100	50	12	23
Vigía I	100	50	27	47

Los resultados indican que los SVC están compensando adecuadamente, tal como se puede observar en la Fig. 14 que muestra la diferencia de las tensiones de las subestaciones de 230 kV del Sistema Occidental antes y después de la compensación, la Fig. 15 muestra las subestaciones de 34,5 kV y 13,8 kV sin y con compensación y por último, la Fig. 16 que indica las tensiones en 115 kV sin y con compensación en todas las barras.

En las Fig. 17, 18, 19 y 20, se muestra el efecto de los SVC en la seguridad de voltaje, donde se observa que la tensión crítica, en las barras asumidas como las más débiles, es incrementada de manera importante.

- Indicador de estabilidad de tensión lineal (LVSI) usando el equivalente de dos barras después de la compensación

Después que se realizó la compensación del Sistema Occidental se decidió volver a calcular el equivalente de dos barras para así ver el comportamiento del índice IVSI. Del flujo de carga obtenido por NEPLAN® y asumiendo un $V_s = 1 \angle 0$. Se obtuvo los valores de la Tabla 6

▪ Indicador de estabilidad de tensión integrada (IVSI) después de la compensación

A partir de los datos obtenidos en el flujo de carga dado por NEPLAN® después de la compensación, se obtiene el índice IVSI para el caso base, mostrado en la Tabla 7. El resultado indica una disminución del valor del índice integrad IVSI, lo cual significa que el sistema es más seguro, desde el punto de vista de la estabilidad de voltaje.

Tabla 6: Valores del LVSI para el caso base antes y después de la compensación en el Sistema Occidental.

Caso	LVSI sin compensar	LVSI compensado
Equiv. De 2 barra-Caso Base	0,044024	0,032085

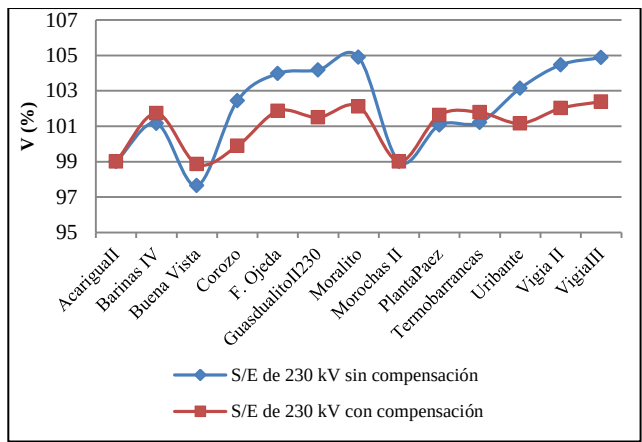


Fig. 14: S/E de 230 kV sin y con compensación.

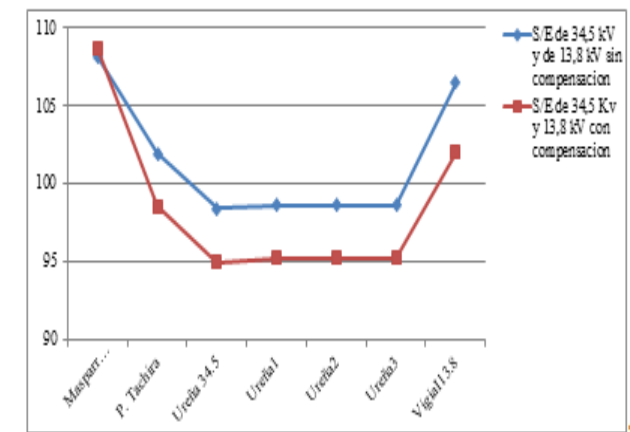


Fig. 15: S/E de 34,5 kV y 13,8 kV sin y con compensación.

Tabla 7: Índice IVSI antes y después de la compensación

Caso	IVSI sin compensar	IVSI compensando
Caso Base	0,000559	0,000508

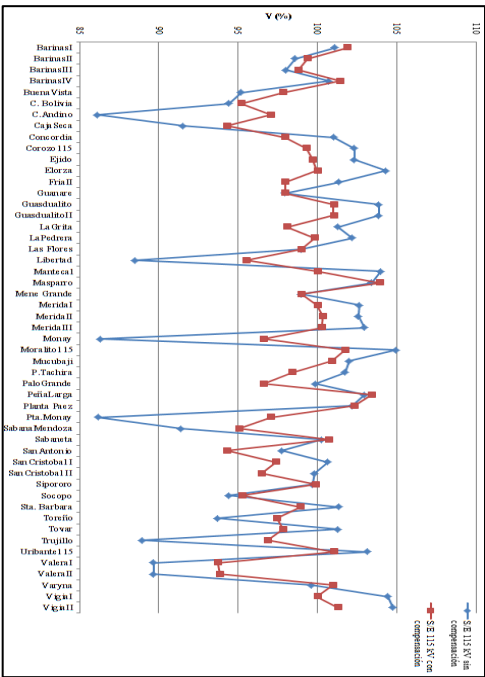


Fig. 16: S/E de 115 kV sin y con compensación.

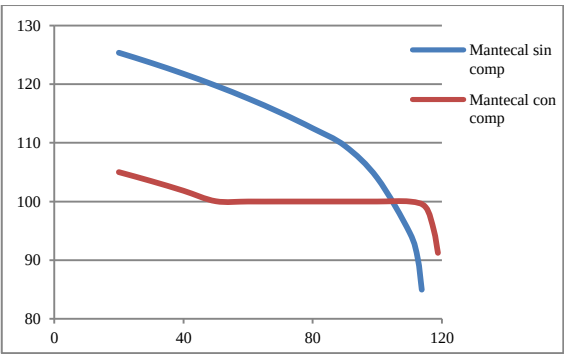


Fig. 17: Curva P-V del nodo Mantecal sin y con compensación.

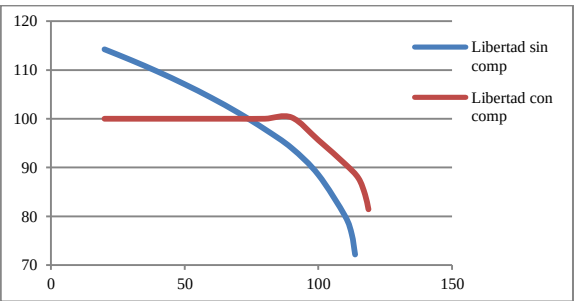


Fig.18: Curva P-V del nodo Libertad sin y con compensación.

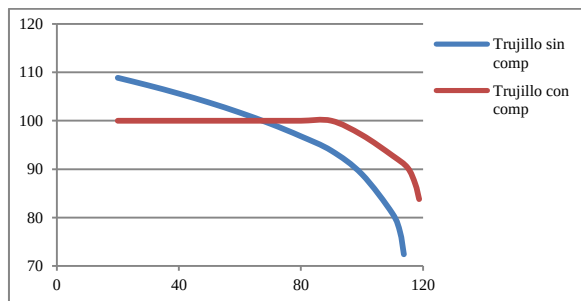


Fig. 19: Curva P-V del nodo Trujillo sin y con compensación.

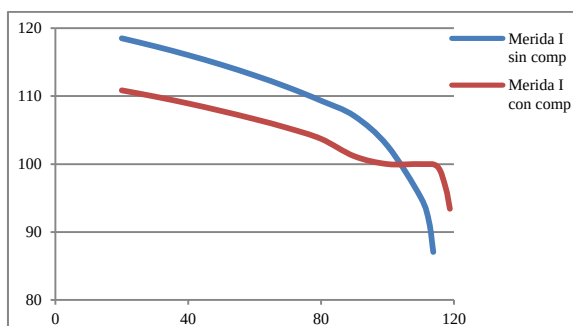


Fig. 20: Curva P-V del nodo Mérida I sin y con compensación.

En la Fig. 21 se presenta el índice IVSI antes y después de la compensación en función de la carga. De los resultados obtenidos se puede verificar nuevamente como mejora la seguridad de tensión del sistema occidental al poder comprobarse que el punto de colapso para el sistema sin compensar ocurre para una potencia de 59,102 MW mientras que para el sistema compensado ocurre para una potencia mayor e igual a 64,102 MW.

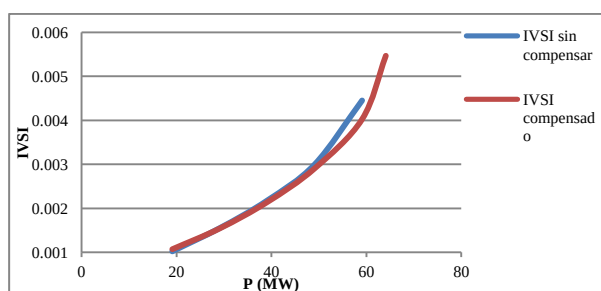


Fig. 21: Comparación del IVSI antes y después de la compensación.

4 Conclusiones

El sistema de transmisión Occidente posee un perfil de tensiones en condiciones irregulares, ya que existen barras en las cuales la tensión está por debajo del valor mínimo permitido y barras en las cuales la tensión está por encima del

máximo aceptado, por lo que es necesario un estudio detallado del mismo. En consecuencia, el actual Sistema Occidental es un sistema inestable.

La compensación de los sistemas ayudaría en gran manera en el fortalecimiento del mismo ante una perturbación. En este trabajo se compensó utilizando SVC, posteriormente, luego de varias compensaciones se decidió realizar la compensación en forma simultánea en varias de las subestaciones más sensibles del sistema, arrojando como resultados, una mejora importante en las tensiones de las subestaciones de 230 kV y 115 kV, específicamente, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango permitido por las normas COVENIN (95%- 105%).

Con la compensación se puede verificar que el punto de colapso para el índice LVSI disminuye con respecto al LVSI sin compensación, de manera que se valida su implementación y por tanto el colapso del sistema tardaría más en ocurrir. Con este resultado se puede decir que se comprueba el uso del índice LVSI como indicador de estabilidad resaltando que después de una compensación su valor mejora.

Con la compensación adicionalmente, se puede ver que el punto de colapso para el índice IVSI aumenta para una potencia mayor, por consiguiente, el colapso del sistema tardaría más en ocurrir. Con este resultado se puede decir que el índice IVSI se comprueba y se resalta además que su valor mejora después de realizar una compensación.

Recomendaciones

Los problemas de estabilidad de tensión del sistema están relacionados con la falta de centros de generación de reactivos. Se recomienda realizar el estudio en forma más detallada ya que en el uso del software se realizaron varias aproximaciones que han podido conllevar a errores en los resultados.

Adicionalmente, se recomienda realizar la compensación del sistema tomando otras barras críticas, para observar si se puede reducir el número de compensadores y así ver si las variaciones de estos índices mejoran.

Referencias

- Chakraborty K, Chakraborti A, De A, 2011, Integrated Voltage Stability Indicator Based Assessment of Voltage Stability in a Power System and Application of ANN. [Artículo en línea]. Disponible en: http://www.sid.ir/en/VEWSSID/J_pdf/89020110204.pdf. Fecha de consulta: 06 Marzo 2016.
- Chakraborty K. Chakraborti A, 2015, Soft Computing Techniques in Voltage Security Analysis. Energy Systems in Electrical Engineering, © Springer India. India.

CORPOELEC, Despacho de Carga- Valera. (2015).
El-Kateb.M., Abdelkader, S., &Kandil, M. (1997). Linear indicator for voltage collapse in power systems.Revista: IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 144.
Gonzalez F, 2004, Control de potencia reactiva-voltaje. [Documento en línea]. Disponible en: http://fglongatt.org/OLD/Archivos/Archivos/SP_II/Captiulo 5.pdf. Fecha de consulta: 18Marzo 2016.
Nguyen T, Yoon Y, 2012,A New Method for Static Voltage Stability Assessment based on The Local Loadability Boundary. Revista: International Journal of Emerging Electric PowerSystems, Vol. 13.
Rashid M, 2004, Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones. Tercera edición, Pearson Educación, México.
Sunita D, Palukuru N, SubrataP, 2010,Global Voltage Stability Analysis of a Power System Using Network Equivalencing Technique in the Presence of TCSC.[Artículo en línea]. Disponible en: http://lejpt.academicdirect.org/A16/053_068.pdf. Fecha de consulta: 06Marzo 2016.
Vu K, Begovic M, Novosel D, Mohan M,1997,Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin.Revista: IEEE Transactions on Power Systems, Vol.14.
Zabaiou T, Dessaint L, Kamwa I, 2013, Preventive control approach for voltage stability improvement using voltage stability constrained optimal power flow based on static line voltage stability indices. [Documento en línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6812271>. Fecha de consulta: 18Marzo 2016.

Zerpa, Ivana: Ingeniero Electricista. Areas de interés: Compensación estática y dinámica de sistemas de potencia, análisis de sistemas de potencia, Correo electrónico: iva-vane1111@hotmail.com

Muñoz, Juan: Ph.D. en Ingeniería Eléctrica y de Computación. Areas de investigación: Estabilidad de sistemas de potencia, flujo de carga óptimo, redes inteligentes, despacho económico, energías alternativas.

Mora, Ernesto: MSc en Ingeniería Eléctrica. Areas de interés: Análisis de sistemas de potencia, compensación estática y dinámica, estabilidad de sistemas de potencia, métodos de solución de sistemas de potencia. Correo electrónico: morae@ula.ve

Ballester, Lelis: MSc en Sistemas Eléctricos de Potencia. Areas de interés: Compensación estática y dinámica de sistemas de potencia, estabilidad y confiabilidad de sistemas de potencia, energías alternativas, calidad de energía. Correo electrónico: lnelson@ula.ve