

Capítulo 86

El tren de levitación magnética – MAGLEV como alternativa de transporte masivo. Caso de estudio: Japón

Noguera Gottberg, María Alejandra

Dpto. Tecnología y Diseño. Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, ULA,
Mérida 5101, Venezuela
marianoguera@.ula.ve

Resumen

El transporte es uno de los problemas más importantes a los que se enfrenta la vida moderna. Muchas tecnologías se han desarrollado, a fin de conseguir nuevas formas para transportarse. Aun en estos tiempos, es frecuente que los medios de transporte sean lentos, caros o simplemente no tengan la capacidad suficiente para movilizar el volumen de personas requeridas. Japón, posee uno de los sistemas de transporte más complejos del mundo, el cual solo puede ser descrito como masivo. Este sistema está basado en la combinación de una red integrada de transportes. La línea Shinkansen de trenes de alta velocidad, ante los aviones, que aún hoy en día representan la manera más rápida de viajar; son una de las mejores opciones, al considerar aspectos de costo, tiempo comodidad y seguridad. El mayor avance tecnológico posible en Shinkansen es la incorporación del superconductor Maglev. Ya se han cubierto un total de 4000 kilómetros de operaciones de prueba y no se ha tenido problemas con superconductores de levitación. Se conectará Tokio y Osaka en 1 hora. Además, 10 trenes serán operados por hora, llevando a 100.000 pasajeros por trayecto. Esto va a cambiar por completo la estructura económica actual en Japón y por lo tanto representa un proyecto de suma importancia dentro del área de transporte masivo de pasajeros.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

Japón posee una de las redes de transporte público más eficientes y sofisticadas del mundo, sobre todo en las áreas metropolitanas y entre las grandes ciudades. Se caracteriza por su puntualidad, excelente servicio y las grandes multitudes de personas que lo usan. En este punto es importante destacar, que Japón posee un total 126.573.481 millones de habitantes según estadísticas ofrecidas por la Oficina de Estadística del Ministerio de Asuntos Internos y Comunicación Japoneses (cifra que contempla hasta el mes de Diciembre de 2015) Este sistema incluye: trenes, aviones, buses, ferris, carros y bicicletas. Sin embargo, es extendido entre los japoneses que el tren es la mejor manera de viajar en Japón, ya que cuatro de las islas principales (Honshu, Hokkaido, Kyushu y Shikoku) están cubiertas por una extensa y confiable red de trenes; inclusive son servidos por la red de líneas de alta velocidad que conectan Tokio con la mayoría de las principales ciudades del país. Al inaugurar los 515 kilómetros de línea de alta velocidad entre Tokio y Osaka en octubre de 1964, Japón alcanzó un logro todavía mayor que el de impulsar su propia economía. Abrió una era del transporte completamente nueva con un innovador sistema ferroviario. Con ello prestó un innegable servicio al mundo ferroviario, desencadenando un auge global de la alta velocidad e inyectando aire fresco a una industria que estaba en claro declive.

Alrededor del 70 por ciento de la red ferroviaria de Japón es propiedad y está operado por la JapanRailways (JR), mientras que el 30 por ciento restante pertenece a docenas de otras compañías ferroviarias privadas, especialmente en y alrededor de las áreas metropolitanas. El Grupo JR se compone de seis compañías ferroviarias de pasajeros regionales, que son JR Hokkaido, JR East, JR central, JR West, JR Shikoku, Kyushu y JR, y una empresa ferroviaria de mercancías en todo el país, JR Freight.

Central JapanRailwayCompany (JR Central, mejor conocida como JR Tokai) inicia operaciones en Abril de 1987 luego de la privatización y quiebre de JapaneseNationalRailways (JNR). El corazón de las operaciones de JR Central es TokaidoShinkansen, la línea de transporte que une las principales áreas metropolitanas japonesas de Tokio, Nagoya y Osaka y una red de líneas convencionales.

Las serias y aceleradas limitaciones de capacidad de transporte a lo largo de la principal arteria entre Tokio y Osaka fueron las causas de la creación de esa línea shinkansen (Socorro y col., 2013). Es de pensar que la movilización del gran número de personas creaba una situación insostenible, pues considerando lo que plantea Central JapanRailwayCompany (2015) en su AnnualReport 2015, en el corredor vive el 64,5% de la población total del país, lo cual se realciona con una densidad poblacional de 253 personas por milometrometro cuadrado, se produce el 70% de la industria nacional y se genera el 60% de los ingresos. Se necesitaba una solución y, se optó por la alta velocidad, que permitía un mayor número de viajes diarios entre las dos ciudades

(Kasai 2000). Hoy en día es posible afirmar que TokaydoShinkansen transporta por día aproximadamente 430.00 pasajeros, con 350 trenes operando, lo cual se traduce en una movilización anual de 155.000.000 de personas (JapanRailwayCompany, 2015)

Según Takatsu (2007), Shinkansen significa literalmente nueva línea troncal, en referencia a las vías, pero el nombre se utiliza ampliamente dentro y fuera de Japón para referirse a los trenes, así como el sistema en su conjunto. El nombre SuperExpress, utilizada inicialmente para los trenes Hikari, se retiró en 1972, pero todavía se utiliza en anuncios, literatura, y señalización. Al contrario de la red original, el Shinkansen utiliza el ancho de vía normal (1.435 mm) y se vale de túneles y viaductos para atravesar obstáculos, en vez de rodearlos.

Además es importante señalar que desde los inicios de su operación (1964), no han habido accidentes con resultado de muerte o lesiones a los pasajeros a bordo; el personal está altamente cualificado en la conciencia de seguridad mediante una formación integral. Posee un sistema de control de trenes con una sofisticada tecnología, se lleva a cabo una inversión relacionada con la seguridad continua (incluidas las medidas contra el descarrilamiento y comportamiento anti-sísmico), además de un refuerzo de las infraestructuras (Smith 2014). No hay que olvidar que se trata de un territorio frecuentemente castigado por terremotos y tifones. Señala Jiang y Li (2016) que Shinkansen posee una demora media anual de 0,9 minutos por tren operativo, incluyendo los retrasos debidos a causas incontrolables, tales como desastres naturales. Principalmente en este trabajo, se reflexionará sobre el uso de trenes de levitación magnética como alternativa en el transporte masivo de pasajeros, frente al uso del tren convencional y el transporte aéreo.

2 Fundamentos teóricos

La revolución industrial llegó tarde a Japón si se compara con los países occidentales. No fue hasta el nacimiento de la Era Meiji (1868-1912) que el país comenzó a emerger de casi 200 años de completo aislamiento del resto del mundo, con un sistema de transporte rudimentario, que se basaba únicamente en la tracción animal.

A ello había que añadirle según lo planteado por Gutierrez, Gonzalez y Gómez (1996), unas redes primitivas y poco conservadas, a través de un territorio muy montañoso y muy denso forestalmente. Incluso hoy en día apenas un 20% del territorio es considerado habitable. También hay que tener en cuenta la gran extensión del país: desde la septentrional isla de Hokkaido hasta la isla subtropical de Kyushu se extienden más de 2.000 km.

El turno del ferrocarril llegó con la línea que uniría los 29 km que separan Shinagawa en Tokio de Yokohama, un puerto que estaba desarrollando una importante función comercial. En este primer paso se utilizó íntegramente tecnología británica con ancho de vía estrecho (1,067 m). Esta línea se comenzó a operar en octubre de 1872 (Smith 2003).

A partir de aquí la red fue expandiéndose de manera que en 1877 ya constaba de 80 km. Está claro que Japón llegaba muy tarde a esta carrera, ya que por estas mismas fechas la red francesa tenía unos 16.000 km y la británica aproximadamente 24.000 km.

Se optó por una expansión radial, de tal forma que las principales líneas salían desde Tokio, la capital. La ruta más importante, inaugurada en 1889, unía Tokio con el puerto de Kobe, pasando por Yokohama, Nagoya, Kioto y Osaka, en 20 horas. De esta forma, esta zona costera de la isla de Honshu pasó a tener un mayor peso en el poder financiero, gubernamental, cultural e industrial del país.

Aunque las primeras líneas habían sido promovidas y gestionadas por el Estado, rutas gestionadas por empresas privadas fueron adquiriendo importancia. Estas últimas desempeñaron un importantísimo papel en el crecimiento acelerado que vivió el ferrocarril japonés a principios del siglo XX. En 1906, el conjunto total de vías ya se extendía a lo largo de 7.000 km.

Después de la Guerra de Corea, JNR (Japan National Railway) comenzó a sufrir un grave problema: el volumen de transporte de la línea Tokaido (556 km) que conectaba Tokio con Osaka, el centro del comercio y de la industria al oeste de Japón, estaba incrementando de forma acelerada debido al gran crecimiento de la economía.

Además JNR vivía en un clima de desconfianza de sus usuarios. Graves accidentes ocurridos en la última década ponían en duda la seguridad del transporte. La suma de fallecidos entre 1950 y 1965 alcanzaba casi los 1.600. Aunque entonces JNR también gestionaba rutas de ferry en las costas niponas, sobre todo entre las cuatro islas principales, hubo varios desastres ferroviarios que iban desgastando poco a poco su reputación.

Plantea Knutton (2004), que para mejorar la capacidad de la línea se introdujeron los trenes Kodama, que recorrían los 556 km en seis horas y media. Pero la solución parecía insuficiente ante el incremento de demanda. Esta línea transportaba el 24% del total de pasajeros de JNR y un 23% de las mercancías. A esto había que añadirle un incremento anual meteórico del 7,6%. Tratándose únicamente de un 3% del total de los kilómetros que había en servicio por aquel entonces, estaba claro que la capacidad de la línea debía ser aumentada para poder hacer frente a la demanda futura. La situación era tan desesperante que incluso recibió un apodo dramático: “kotsujigoku” (tráfico infernal).

Estadísticas del momento indicaban que el tráfico se habría doblado en 1975. Se plantearon tres opciones para mejorar la situación: a) construcción de una línea de ancho estrecho paralela a la existente, b) construcción de una línea de ancho estrecho con un trazado completamente distinto, y c) construcción de una línea de ancho internacional como las construidas en la mayoría de países europeos.

En un principio, la primera opción era la que contaba con más partidarios. De hecho ya había algunos tramos en los alrededores de Tokio donde ya se había llevado a cabo, desdoblado las líneas existentes para aumentar la capaci-

dad. Pero esta medida no solucionaba el inconveniente de la baja velocidad, ya que las curvas de la antigua línea eran demasiado pronunciadas para la alta velocidad.

Plantea Wakuda (1997) que el impulso definitivo a la implementación de alta velocidad en Japón lo dio el RTRI (Railway Technical Research Institute), que en mayo de 1957 publicó “The Highspeed Railway of the Future”, basado en estudios propios, que proponía la creación de nuevas tecnologías ferroviarias (carril, trenes, seguridad, etc) más avanzadas a las que existían por aquel entonces. Se sugirió por primera vez la posibilidad de recorrer la distancia entre Tokio y Osaka en apenas tres horas, alcanzando en algunos tramos una máxima velocidad de 250 km/h. La decisión que se tomó también vino influenciada por el remarcable crecimiento que estaba experimentando el tráfico aéreo y por carretera.

Los Ferrocarriles Nacionales Japoneses (JNR), fue el órgano que operó la red nacional ferroviaria de Japón desde 1949 hasta 1987, año en que fue privatizada y sustituida por el grupo Japan Railways (JR) que sigue operando hasta la actualidad. Establece Sone (2001) que JR es un grupo de empresas que opera las líneas de ferrocarril de Japón que pertenecieron al Estado. Consiste en un grupo de 7 empresas que controla las operaciones, los activos y pasivos de lo que fue la empresa estatal JNR, desde el 1 de abril de 1987.

La Hokkaidō Railway Company es una de las compañías constitutivas del Japan Railways Group y por ello a menudo se le conoce como JR Hokkaidō. La compañía opera servicios de ferrocarriles interurbanos en Hokkaidō, Japón.

La East Japan Railway Company es la empresa ferroviaria de pasajeros más grande del mundo y una de las siete empresas pertenecientes al Grupo Japan Railways. El nombre de la compañía se suele abreviar a JR East. Sus líneas de ferrocarril sirven a la región de Kantō y Tōhoku, junto a algunas áreas adyacentes en Niigata, Nagano, Yamanashi y Shizuoka.

La Central Japan Railway Company es la principal empresa de ferrocarril que funciona en la región Chūbu (Nagoya) de Japón Central. A menudo es más conocida JR Central. La principal línea de ferrocarril es la línea Tōkaidō entre la estación Atami y la estación Maibara. JR Central también opera el Tōkaidō Shinkansen entre la estación de Tokio y la estación de Shin-Ōsaka. Señala Doi (2003), que además es responsable del proyecto de Chūō Shinkansen (un servicio Maglev entre la estación de Shinagawa en Tokio y la estación de Shin-Ōsaka) del cual se ha construido una sección de demostración.

La West Japan Railway Company cuyo nombre suele abreviarse JR West, posee la línea Sanyō Shinkansen, entre Osaka y Fukuoka. El Sanyō Shinkansen representa alrededor del 40% de los ingresos en pasajeros de JR West. La empresa también opera la Línea Hakata Minami, una línea de cercanías corta con trenes del Shinkansen en Fukuoka.

La Shikoku Railway Company es más conocida como JR Shikoku. El ferrocarril opera en la isla de Shikoku, y su principal tramo es la Línea Yoson.

La KyushuRailwayCompany, también conocida como JR Kyushu. Opera ferrocarriles interurbanos en la isla de Kyushu, Japón así como el Ferry de Kyushu, que une las ciudades de Fukuoka y Busan, ésta última en Corea del Sur.

Según Takatsu (2007), Shinkansen significa literalmente nueva línea troncal, en referencia a las pistas, pero el nombre se utiliza ampliamente dentro y fuera de Japón para referirse a los trenes, así como el sistema en su conjunto. El nombre SuperExpress, utilizada inicialmente para los trenes Hikari, se retiró en 1972, pero todavía se utiliza en anuncios inglés y literatura, y señalización (Suga 2003).

Los Shinkansen se diferencian de cualquier otro modo terrestre en que recorren el mismo trayecto en menos tiempo. Pero ¿Qué ha significado la apertura de las nuevas líneas para los usuarios en cuanto al tiempo de viaje?. Plantea Inoue y col., (2015), que en el caso del TokaidoShinkansen se redujo el tiempo de viaje de 6:30 horas a 3:10, menos de la mitad, en 1964; y se ha rebajado hasta 2:30 horas en la actualidad. La velocidad máxima es de 320 km/h. Recorridos de ensayo han alcanzado 443 km/h para el ferrocarril convencional en 1996, y hasta un récord mundial 581 km/h para trenes Maglev en 2003.

Señala Hood (2006) que las líneas shinkansen existentes y los servicios que prestan a los usuarios son:

Tokaido (552,6 km): Se trata de la primera línea de alta velocidad ferroviaria de la historia (1964). Une las dos regiones motores de la economía japonesa (Osaka y Tokio). El servicio más veloz es el Nozomi, que actúa desde 1992 (usando la serie 700, alcanzan velocidades de hasta 300 km/h, también existe el Hikari y el Kodama).

Sanyo (622,3 km): La apertura de esta línea supuso la conexión ferroviaria entre Osaka y Hakata, pues se trata de la prolongación de la línea Tokaido desde Osaka hacia el sur hasta Fukuoka. Los trenes provenientes de Tokio y que se detienen en Osaka prosiguen la ruta hacia el sur por la línea Sanyo, por lo que los viajeros no tienen que hacer ningún trasbordo en Osaka. Este hecho optimiza el servicio prestado, ya que tanto el tiempo efectivo de viaje como la incomodidad del viajero disminuyen. No hay que olvidar que las líneas Tokaido y Sanyo son gestionadas por dos operadores distintos, JR Tokai y JR West respectivamente. De esta forma, existen los mismos servicios que en la línea anterior: Nozomi, y Kodama. Además existe también el Mizuho es la categoría más rápida del tren a lo largo del Sanyo Shinkansen y el Sakura opera entre Shin-Osaka y Kagoshima-Chuo pero se detiene en algunas estaciones más que el Mizuho.

Tohoku (631,9 km): Actualmente une Tokio con Hachinohe, una de las ciudades más septentrionales de la isla. Seis categorías de trenes operan en el TohokuShinkansen: El Hayabusa es la categoría más rápida del tren a lo largo del TohokuShinkansen, sirviendo sólo las principales estaciones entre Tokio y Shin-Aomori. Con velocidades de hasta 320 km/h. El Yamabiko es la siguiente categoría de más rápido tren a lo largo del TohokuShinkansen, corriendo hacia el norte hasta Morioka, aunque algunos terminan en

Sendai. Muchos trenes Yamabiko se acoplan con un tren de Tsubasa entre Tokio y Fukushima. El Nasuno es la categoría más baja del tren a lo largo del TohokuShinkansen, sirviendo a todas las estaciones entre Tokio y Koriyama y la orientación a viajeros de Fukushima y Tochigi. El Komachi es la única categoría de tren del Akita Shinkansen. Los trenes están acoplados con trenes Hayabusa entre Tokio y Morioka y corren por su cuenta entre Morioka y Akita. Los trenes cambian direcciones entre Akita y Omagari, la última estación antes de Akita. El Tsubasa es la única categoría de tren del Yamagata Shinkansen. Prácticamente todos los trenes Tsubasa se acoplan con un tren Yamabiko entre Tokio y Fukushima y correr por su cuenta entre Fukushima y Shinjo. Algunos trenes terminan en la estación de Yamagata.

Joetsu (333,9 km): Une Tokio con Niigata. El recorrido entre la capital y Niigata es complicado en cuanto a topografía y climatología. Existen básicamente dos servicios: Toki y Tanigawa. El primero puede parar en todas las estaciones, pero las va alternando dependiendo del viaje. En cambio el Tanigawa para en todas las estaciones, pero sólo hasta Echigo-Yuzawa. Igual que en el caso del Tohoku, también existen trenes de dos pisos que realizan este recorrido. Son los Max Toki y Max Tanigawa.

Hokuriku (222,4 km): Esta línea aprovecha la parte de la Joetsu Line de Tokio a Takasaki, para desviarse desde ahí hacia Nagano. Únicamente existe el servicio Asama. Los Asama se detienen 5, 8 o 10 veces entre Tokio y Nagano, variando el tiempo de viaje considerablemente. Las estaciones principales entre Takasaki y Nagano son Karuizawa, Sakudaira y Ueda.

Kyushu (137,6 km): Se trata de la línea más reciente dentro del panorama japonés. El KyushuShinkansen une la ciudad de Kagoshima, al norte de la isla, con Yatsushiro. Está previsto que continúe hasta Fukuoka, de manera que recorra Kyushu de norte a sur y conecte con la Sanyo Line. Tres categorías de trenes operan en el KyushuShinkansen: El Mizuho es la categoría más rápida del tren, parando sólo en Hakata, Kumamoto y Kagoshima-Chuo. Proporciona a través del servicio a la Sanyo Shinkansen hacia/desde Osaka. Sin embargo, actualmente sólo hay seis viajes de ida y vuelta por día en las mañanas y las tardes. El Sakura es la categoría de segundo más rápido en tren por el KyushuShinkansen, que sirve un buen número de estaciones más que el Mizuho. Generalmente hay dos salidas por hora, con un poco de presencia a través de servicio a la Sanyo Shinkansen hacia/desde Osaka.

El Tsubame es la categoría más baja del tren a lo largo del KyushuShinkansen, con parada en todas las estaciones a lo largo del camino. La mayoría de los trenes sólo funcionan entre Hakata y Kumamoto.

Mini-Shinkansen: Ante los elevados costes que supone la construcción de líneas completamente nuevas para alta velocidad, JR East decidió modificar varias líneas métricas, ensanchando la vía a ancho internacional. Así, las ramas de alta velocidad podrían circular por estas líneas. La velocidad máxima, sería menor, ya que las características geomé-

tricas (radio, peralte o pendiente) son las de la línea original, diseñada para velocidades menores. Actualmente los trenes circulan a 130 km/h.

Existen dos líneas Mini-Shinkansen, que actúan como lanzaderas a ciudades alejadas de la línea Tohoku:

Yamagata (148,6 km): En esta línea sus trenes van acoplados a los que circulan por la Tohoku Line y se desvían en la estación de Fukushima para dirigirse a Shinjo, pasando por Yamagata y Murayama. De esta manera los viajeros no tienen que descender del tren para realizar el trasbordo. Los trenes de esta línea son más cortos (7 coches frente a los 10 de los de la línea Tohoku), ya que se trata de una zona de menor demanda. El servicio recibe el nombre de Tsubasa y va acoplado únicamente a los Max-Yamabiko de dos pisos, para continuar hasta Shinjo o, en algunos casos, únicamente hasta Yamagata.

Akita (127,3 km): Esta línea tiene un funcionamiento análogo a la Yamagata, solo que los trenes son de 6 coches en este caso y circulan acoplados a los Hayate hasta Morioka. Desde ahí circulan independientemente hasta Akita, pasando por Shizukuishi, Tazawako, Kakunodate y Omagari. Tiene mucho sentido utilizar el servicio Hayate hasta Morioka y no el Max-Yamabiko como en el Yamagata, ya que la distancia desde Tokio hasta Morioka es casi el doble que hasta Fukushima, por lo que se necesita un servicio hasta el inicio de la lanzadera más eficaz y veloz. El servicio del Akita Shinkansen se denomina Komachi.

Tal y como exponen Luu y Nguyen (2005), el ChuoShinkansen es la línea Maglev (levitación magnética) diseñada para conectar finalmente Tokio, Nagoya y Osaka. Su recorrido inicial previsto es de entre la estación de Shinagawa en Tokio y la estación de Nagoya en Nagoya, con estaciones en Sagami-hara, Kanagawa, Kofu, Yamanashi, y Nakatsugawa y Gifu. La línea espera conectar Tokio y Nagoya, en la primera etapa en 40 minutos, y, finalmente, Tokio y Osaka en 67 minutos, funcionando a una velocidad máxima de 505 km/h.

El ChuoShinkansen es la culminación del desarrollo Maglev japonés desde la década de 1970, un proyecto financiado por el gobierno iniciado por Japan Airlines y los antiguos Ferrocarriles Nacionales del Japón (JNR). JR Central ahora opera las instalaciones y la investigación. La línea está destinada a ser construida mediante la ampliación y la incorporación de la pista de pruebas de Yamanashi ya existente. Los trenes mismos son popularmente conocidos en Japón como Linear Motor Car, aunque ha habido muchas variaciones técnicas (Soejima 2003).

El permiso del gobierno para proceder con la construcción fue concedida el 27 de mayo de 2011. La construcción de la línea, se espera que comience en 2014. JR Central pretende comenzar el servicio comercial entre Tokio y Nagoya en 2027, con la sección de Nagoya-Osaka que se completará en 2045. JR Central está considerando abrir el servicio de demostración de una nueva estación en Kōfu por los Juegos Olímpicos de 2020 para que los turistas puedan viajar en la pista experimental a través de las montañas de

Yamanashi.

En la década de 1970, una pista de pruebas para la investigación y el desarrollo Maglev había sido construido en la localidad de Miyazaki. Como se habían obtenido los resultados deseados en la ahora ex-pista de pruebas de Miyazaki, una nueva pista de pruebas de 18,4 kilómetros de túneles, puentes y taludes se construyó en un nuevo sitio en Yamanashi, entre Otsuki y Tsuru (35.5827 ° N 138.927 ° E). Los residentes de Yamanashi y funcionarios del gobierno fueron elegibles para viajes gratis en la pista de pruebas de Yamanashi, y más de 200.000 personas participaron. Los trenes de esta pista de pruebas han logrado rutinariamente velocidades de operación de más de 500 km/h.

La pista se amplió otros 25 kilómetros a lo largo de la ruta futura de la ChuoShinkansen, para traer la longitud de pista de 42,8 kilómetros. La ampliación y mejora se completó en junio de 2013, lo que permitió a los investigadores probar la velocidad máxima sostenida durante períodos más largos. Las primeras pruebas que cubren esta pista ya se llevaron a cabo en agosto de 2013.

El funcionamiento básico de ChuoShinkansen depende de la levitación magnética. De acuerdo a lo planteado por Pérez, García y Díaz (2009), se define como levitación magnética, al fenómeno por el cual un material puede, levitar gracias a la repulsión existente entre los polos iguales de dos imanes, o bien debido a lo que se conoce como “Efecto Meissner”, propiedad inherente a los superconductores.

Un superconductor es un material que no opone resistencia al flujo de corriente eléctrica por él. Barone (1995) señala que el Efecto Meissner es la capacidad de los superconductores de rechazar un campo magnético que intente penetrar en su interior. De manera que se acerca un imán a un superconductor, se genera una fuerza magnética de repulsión la cual es capaz de contrarrestar el peso del imán produciendo así la levitación del mismo.

En este orden de ideas, Fana y Malozovsky (2013) opinan que la superconductividad es una característica de algunos materiales, los cuales, por debajo de una cierta temperatura crítica, no oponen resistencia al paso de la corriente; es decir: son materiales que pueden alcanzar una resistencia nula. En estas condiciones de temperatura no solamente son capaces de transportar energía eléctrica sin ningún tipo de pérdidas, sino que además poseen la propiedad de rechazar las líneas de un campo magnético aplicado.

Hoy en día el uso más extendido del fenómeno de levitación magnética se da en los trenes de levitación magnética (Quan-Sheng y col., 2005). Un tren de levitación magnética es un vehículo que utiliza las ondas magnéticas para suspenderse por encima del carril (algunos de estos trenes van a 1 cm por encima de la vía y otros pueden levitar hasta 15 cm) e impulsarse a lo largo de un carril-guía.

Las investigaciones acerca del tren de levitación magnética iniciaron aproximadamente hace más de un siglo comenzando con el desarrollo del motor lineal para la tracción (Raghuathan y col., 2002). En este orden de ideas, plantean Laithwaite y Barwell (1964), que en 1905 se creó un

sistema de tracción tangencial que fue patentado en Bélgica. Sin embargo, resultó ser claramente costoso, como sería cualquier sistema con segmento principal (estator) prolongado.

Tal vez el comienzo fue en 1934, como plantea Thornton (1975) cuando el 14 de agosto Hermann Kemper patenta el sistema de levitación magnética para trenes (DRP 643 316). Sus inventos condujeron a importantes investigaciones sobre la tecnología de levitación magnética en otros países.

Esto llevó a las bases de los modelos a gran escala, tales como el sistema del Transrapid en Alemania y en el tren de motor lineal en Japón. Plantea Tanaka (2014) que estos dos modelos utilizan tecnologías diferentes, pero se basan en un principio básico de atracción y repulsión de los campos magnéticos.

Señala Wako (2000) que dentro de la levitación magnética existen tres tipos de tecnologías: la suspensión electromagnética (EMS), la suspensión electrodinámica (EDS) y la suspensión electromagnética híbrida (HEMS).

En relación a la Suspensión Electromagnética (Electromagnetic Suspension, EMS), la levitación se logra sobre la base de la fuerza de atracción magnética entre un carril y electroimanes.

Dentro de la EMS, hay dos tipos de tecnologías de levitación: a) Levitación y orientación integrada, tales como el coreano UTM y el japonés HSST, y b) Levitación y orientación separada como el Alemán Transrapid.

Se le llama superconductividad a la característica que poseen ciertos materiales para conducir corriente eléctrica sin resistencia ni pérdida de energía, en determinadas condiciones, pero estos materiales tienen un determinado comportamiento magnético; dicho comportamiento no permite que un campo magnético externo penetre, con lo cual se puede lograr que un material levite.

Esta tecnología emplea campos magnéticos poco peligrosos mediante electroimanes convencionales. Permite velocidades muy altas aunque el principal problema que presenta es el alto coste de construcción y de explotación. Esta es la tecnología utilizada por Japón y por Alemania en el Transrapid.

La Suspensión Electrodinámica (Electrodynamics Suspension, EDS) según lo señalado por Spielmann, De Haan y Scholz (2008), se rige por utilizar la fuerza de repulsión para levitar, por lo cual, cuando los imanes unidos al tren avanzan hacia adelante en las bobinas inductoras o en las láminas conductoras situadas sobre el carril, se inducen un flujo de corrientes a través de las bobinas o en las láminas conductoras, logrando generar un campo magnético.

Este sistema permite transportar altas cargas de peso a altas velocidades utilizando superconductores refrigerados por nitrógeno para generar los campos magnéticos. Estos campos son extremadamente potentes y afectan tanto al exterior como al interior del tren, lo que hace imposible que pasajeros con marcapasos puedan viajar en él con seguridad. El principal problema de esta tecnología no es este sino el coste necesario para su construcción y funcionamiento

La EDS es tan estable magnéticamente que no es necesario controlar la distancia al riel, que es alrededor de unos 100 mm, lo cual proporciona fiabilidad para la variación de la carga. La EDS es muy conveniente para aplicarse en trenes de alta velocidad y de carga, pero necesita una velocidad mínima para alcanzar las corrientes inducidas suficientes para lograr la levitación, lo cual obliga a implementar una llanta de goma debajo de cierta velocidad (aproximadamente 100 km/h) (Lee y col., 2006).

La tecnología de EDS se divide en dos tipos, de acuerdo al tipo de imanes: a) Imán permanente (PM), y b) Imán superconductor (SCM).

Los PM's tienen una estructura muy simple debido a que no necesitan de suministro de energía eléctrica, estos imanes no tienen alta potencia, por lo cual se utiliza en sistemas pequeños. Los SCM's, en comparación con los PM's, tienen una estructura compleja; además de la evaporación del hielo líquido, causada por el calor generado de las corrientes inducidas, esto además puede causar diversos problemas durante el funcionamiento, por lo que es indispensable un sistema de refrigeración para poder mantenerlos en funcionamiento.

Un tren con EDS sería más veloz que con EMS pero más costosa. El EDS elevaría el tren 12 cm, mientras que EMS solo lo eleva 1 cm, creando menos precisión. Mientras que el tren EMS tiene los electroimanes en la parte inferior y a los lados, que ayudan a mantener el tren centrado; los EDS traen solo los electroimanes a los lados y unas bobinas de material superconductor en la parte lateral del tren que son enfriadas con nitrógeno líquido, y así el tren levita y se impulsa.

La Suspensión Electromagnética Híbrida (Hybrid Electromagnetic Suspension, HEMS) se emplea con el fin de reducir el uso de la energía eléctrica en comparación con la EMS, ya que se emplean imanes permanentes y electroimanes (Lee y col., 2006).

En un cierto estado estacionario del riel, el campo magnético del imán permanente (PM) es capaz de soportar el vehículo por sí mismo y la energía eléctrica para los electroimanes que controlan el entrehierro puede ser casi cero. Sin embargo, HEMS requiere una variación mucho más grande de la amplitud de la corriente en comparación con EMS, desde el punto de vista de electroimanes porque el PM tiene la misma permeabilidad que el aire.

Para la levitación, las bobinas están instaladas en las paredes laterales de un carril-guía. Cuando los imanes superconductores del vehículo pasan, varios centímetros por debajo del centro de estas bobinas, una corriente eléctrica es inducida. Como resultado de esta interacción, las partes bajas de las bobinas empujan los imanes superconductores hacia arriba y la parte superior de ellos tiran hacia arriba al mismo tiempo, levitando así el vehículo en movimiento.

Según Thornton (1975), los trenes Maglev tienen un sistema de propulsión, para el cual se implementa un Motor Lineal, el cual es diferente a un motor rotativo convencional, ya que no utiliza el acoplamiento mecánico para el mo-

vimiento rectilíneo. Por lo cual, su estructura es simple y robusta, en comparación con el motor rotativo.

Un motor lineal es un motor eléctrico que posee su estator y su rotor "distribuidos" de forma tal que en vez de producir un torque (rotación) produce una fuerza lineal en el sentido de su longitud. Consiste en un elemento primario, donde se encuentran los devanados, y un elemento secundario que se extiende a lo largo de la distancia que se va a recorrer, aportando como ventaja la posibilidad de poder disponer de varios primarios sobre un mismo secundario.

El motor lineal se adapta de forma natural para usarse en sistemas Maglev. A lo largo de la década de 1970, Laithwaite descubrió un nuevo arreglo de imanes llamados magnético, el cual se compone de una placa delgada conductora sobre un motor lineal de inducción (LIM) de corriente alterna (CA). Debido al flujo transversal y la geometría, en el río magnético, la placa conductora es de un ancho crítico con respecto a los imanes que se encuentra abajo de él. Esto da la levitación, la estabilidad y la propulsión, además de ser relativamente eficiente, lo que permitió un solo motor lineal para poder producir tanto la levitación, así como el empuje hacia adelante (Guo y col., 2007).

Los motores lineales para propulsión de levitación magnética existen de dos tipos: a) Motor lineal asíncrono o de inducción (LIM), y b) El motor lineal sincrónico (LSM)

Cho y col. (2008), señalan que el LIM y el LSM se controlan a través de la frecuencia. A diferencia de la LIM, el LSM tiene una fuente magnética dentro de sí mismo. Por lo tanto, cuando se hace la comparación con el LIM, el LSM resulta que tiene muchas ventajas, tales como una alta eficiencia, el alto factor de potencia, y la alta precisión posicional

En el Motor síncrono lineal (LSM), por lo general se controla la velocidad de desplazamiento del campo magnético mediante dispositivos electrónicos, para regular el movimiento del rotor. Debido a razones de costo los motores sincrónicos lineales raramente utilizan conmutadores, por lo que el rotor a menudo contiene imanes permanentes, o hierro dulce.

Cuenta con una fuente magnética dentro de sí mismo. La interacción entre el campo magnético y la corriente inducida producen la fuerza de empuje. La velocidad del LSM es controlada por la frecuencia.

En el LSM existen dos tipos de acuerdo con el campo magnético. Uno de ellos utiliza los electroimanes con núcleo de hierro (el alemán Transrapid) y el otro utiliza los imanes superconductores, con núcleo de aire (el japonés MLX).

En este sentido Guo y col. (2007) indican que en el Motor lineal asíncrono o de inducción (LIM), la fuerza es producida desplazando un campo magnético lineal que actúa sobre conductores en el campo. En cualquier conductor, sea un bobinado, espira o simplemente un trozo de metal, que se coloca en este campo se inducirán corrientes de Foucault creando un campo magnético opuesto, según determina la ley de Lenz. Los dos campos magnéticos opuestos se

repelerán, creando el movimiento en la medida que el campo magnético barre el metal.

Para los trenes Maglev de alta velocidad se antepone el LSM, porque tiene mayor eficiencia y un mejor factor de potencia que el LIM. La eficiencia económica del consumo de energía es muy importante para la operación en alta velocidad, aún sobre el mayor costo de construcción con respecto al LIM.

Para la propulsión, se emplean las fuerzas repulsivas y atractivas. Bobinas que están situadas en las paredes laterales a ambos lados del carril-guía, se energizan por una corriente alterna trifásica, y produce la creación de un campo magnético cambiante en el carril-guía. Los imanes superconductores a bordo se sienten atraídos y empujados por el campo de desplazamiento, lo cual genera el arrastre del vehículo de levitación magnética.

Los trenes Maglev son sistemas sin contacto que requieren una fuerza de guía para la prevención del desplazamiento lateral. Al igual que la levitación, la orientación se lleva a cabo electromecánicamente por medio de fuerzas magnéticas, para la cual se pueden emplear dos formas: la de repulsión magnética o la de atracción magnética (Wako 2000).

La fuerza de repulsión magnética, se genera mediante el establecimiento de las bobinas de propulsión a los lados izquierdo y derecho del carril guía. Debido a la unión de estas bobinas, la fuerza electromotriz inducida se anula entre sí cuando el tren se coloca en el centro del carril. Sin embargo, una vez que el tren pase cerca de una pared lateral, el flujo de la corriente en las bobinas debido a la fuerza electromagnética (EMF) inducida por la diferencia de distancias, produce la fuerza que guía (Sato y Kato, 2004).

En el MLX, se implementa la conexión de las bobinas de levitación correspondientes en ambas paredes laterales. Estas bobinas funcionan como un sistema de guía. Cuando un tren se desplaza lateralmente, se inducen las corrientes que circulan entre estas dos bobinas, lo que genera la fuerza de guía.

La fuerza de atracción magnética, es generada para reducir la resistencia y aumentar la inductancia cuando el vehículo se desplace lateralmente. Puesto que la energía tiende a fluir hacia reluctancia más pequeña, esta fuerza guía al vehículo lateralmente hacia el centro. Puesto que la orientación está integrada con la levitación, la interferencia entre ambos hace que sea difícil de funcionar a altas velocidades. Por lo tanto, la orientación con fuerza de atracción se utiliza para el funcionamiento a velocidades bajas y medias.

Los trenes Maglev cuentan con baterías a bordo de los vehículos, a pesar de esto, el suministro de energía eléctrica desde el lado de la tierra es necesario para la levitación y la propulsión, para el equipo eléctrico que se encuentra a bordo, así como para la recarga de las baterías. La transferencia de energía a lo largo de la pista implica el uso de un generador lineal o un contacto mecánico basado en la velocidad de operación, por lo cual se dividen en dos tipos (Oura y col., 1998).

Para velocidad de operación media-baja (velocidades de hasta 100 km/h), el tren de levitación magnética, por lo general, se utiliza un contacto mecánico tipo pantógrafo, el cual es un mecanismo articulado que transfiere energía eléctrica al tren para poder ser utilizada. Esta es la razón por la que se utiliza en el tren Maglev con LIM tipo SP, usado en baja y media velocidad

A altas velocidades, el tren Maglev ya no puede obtener energía desde el lado de tierra mediante el uso de un contacto mecánico. Para el MLX, además de un generador impulsado con turbina de gas, se cuenta con dos generadores lineales. El primero utiliza exclusivamente una bobina superconductora (500 kA) y las bobinas de inducido están en los lados superiores e inferiores. El segundo utiliza bobinas de inducido entre las bobinas superconductoras y las bobinas de propulsión y levitación.

Con velocidad, las bobinas de excitación generan un flujo variable en la parte superior de la levitación orientado a las bobinas fijas. En consecuencia, en la parte inferior (bobinas de inducido) se ve un flujo variable, que cruza el espacio de aire. El flujo variable se combina con las bobinas de inducido a bordo, en otras palabras, un flujo de corriente continua creada por las bobinas superconductoras a bordo, el cual se transforma en un flujo de corriente alterna, a bordo, a través de un transformador lineal.

3 Antecedentes

Para habilitar la operación de alta velocidad, Shinkansen utiliza tecnologías avanzadas en comparación con el ferrocarril convencional, y se logra no sólo de alta velocidad, sino también un alto nivel de seguridad y confort. Su éxito ha influido en otros ferrocarriles en el mundo y la importancia y las ventajas de la alta velocidad en consecuencia se ha revalorizado.

Dentro de las investigaciones más significativas desarrolladas se encuentran:

Kasai (2000) en "A History of the Development of Japanese Railway Networks" expone que la introducción de nuevos modelos de trenes ha ayudado a aumentar dramáticamente el servicio ferroviario ganando ventaja sobre las compañías aéreas entre Tokaido y Sanyo. Las emisiones de CO₂ de Shinkansen es una sexta parte de las de los aviones, lo cual ayuda a aumentar la ventaja competitiva ya que las cuestiones ambientales serán cada vez más importantes en el camino. A través de la sustitución del material rodante con nuevos modelos, se garantiza que la velocidad de operación será de 270 km/h en los próximos 5 ± 10 años. El mayor avance tecnológico posible es la incorporación del superconductor Maglev. Ya se han cubierto un total de 4000 kilómetros de operaciones de prueba y no se ha tenido problemas con superconductores de levitación. Se conectará Tokio y Osaka en 1 h. Además, 10 trenes serán operados por hora, llevando a cien mil pasajeros por trayecto. Esto va a cambiar por completo la estructura económica actual en Japón y por lo tanto va a ser un proyecto importante en el

siglo 21.

Schafer y Victor (2000) en su artículo "The future mobility of the world population" señalan que en promedio una persona gasta 1,1 h por día viajando y dedica una parte predecible de ingresos para viajar. Se demuestra que estos presupuestos de tiempo y dinero son estables en el tiempo y el espacio y se puede utilizar para proyección de los niveles futuros de modo de movilidad y transporte. El presupuesto de dinero para el viaje requiere que la movilidad se eleve casi en proporción con el ingreso. Superar mayores distancias dentro del mismo tiempo de viaje requiere que los viajeros se desplazan hacia modos de transporte más rápidos. La elección de los modos de transporte futuros también se ve limitada por la dependencia del camino debido a las infraestructuras de transporte cambian muy lentamente. Además, demanda de transporte público de baja velocidad está parcialmente determinada por la densidad de población urbana. Se presenta un modelo que incorpora estas limitaciones, que utilizamos para proyectar el volumen y la cuota de los principales modos de transporte motorizados ± automóviles, autobuses, trenes y transporte de alta velocidad (principalmente aviones). Se proyecta que en 2050 el ciudadano promedio mundo viajará tantos kilómetros como la media de Europa Occidental en 1990. La movilidad en América aumentará en un factor de 2,6 en 2050, 58.000 km / año. Los viajes en la India alcanzarán una media 6.000 kilómetros / año en 2050, comparable con los niveles de Europa Occidental en la década de 1970.

Román y col. (2007) en "Competition of high-speed train with air transport: The case of Madrid-Barcelona" analiza la posible competencia del tren de alta velocidad con el transporte aéreo entre Madrid y Barcelona. El análisis estima los modelos de elección de modo desagregado utilizando la información proporcionada por la base de datos, que reveló y manifestó preferencias mixtas. Se obtuvo diferentes medidas de disposición a pagar para mejorar la calidad del servicio. En general, los valores de ahorro de tiempo de viaje son más altos para viajes por trabajo y aumenta a medida que el nivel de confort cae. También se obtuvo una estimación de alta disposición a pagar por reducciones en la demora de tiempo, siendo mayor en el caso de los trenes de alta velocidad que para el transporte aéreo.

Baohua y col., (2008) plantean en "Potential Applications of Maglev Railway Technology in China" que a partir de los aspectos de valor científico, la viabilidad técnica y la eficiencia económica, los proyectos de transporte relacionados con la aplicación de diferentes tipos de tecnologías Maglev en diferentes países es bastante acertado. Basado sobre el progreso experimentado, resume las ventajas y desventajas de las tecnologías de levitación magnética en el posible desarrollo de China, y presenta su viabilidad tecnológica y económica de los diferentes tipos de sistemas de levitación magnética y su madurez técnica actual desde el punto de vista de la ingeniería de construcción. Los autores estudian varios proyectos Maglev lleva a cabo en los países, como

Alemania, Japón, Estados Unidos, Países Bajos y Reino Unido, y analizan las principales técnicas, parámetros adoptados, conclusiones relevantes de la ingeniería y la economía y las razones por las cuales no se han iniciado estos proyectos hasta ahora. El documento también revela las características ambientales de las tecnologías de levitación magnética en el transporte urbano e interurbano de China, y estudia las ventajas de la economía técnica y los riesgos potenciales para la promoción de las tecnologías de levitación magnética en la práctica del transporte.

Spielmann y col (2008) señala en “Environmental rebound effects of high-speed transport technologies: a case study of climate change rebound effects of a future underground Maglev train system” que la implementación de nuevas tecnologías de transporte de alta velocidad remoldea el equilibrio de la demanda entre los modos de transporte y los efectos de rebote puede ocurrir. En este trabajo se plantea primero una definición de los efectos de rebote ambientales del transporte de alta velocidad se presenta y se discuten varios casos. En segundo lugar, se desarrolla un método para determinar y cuantificar los efectos de rebote del medio ambiente que emplean la evaluación del ciclo de vida. El efecto rebote ambiental expresa el tamaño de los cambios de impacto ambiental debido a las correcciones de la demanda. Las nuevas tecnologías permiten mayor velocidad de desplazamiento, aunque sobre una base de pasajeros - kilómetro de alta eficiencia energética, podría dar lugar a un mayor impacto ambiental. Esto es ignorado por el enfoque tradicional de la evaluación medioambiental del transporte, lo que se compara es la eficiencia de cada modo de transporte por separado. El enfoque presentado permite comprender mejor las consecuencias de los nuevos servicios de transporte, y facilita la evaluación de las tecnologías de transporte de futuros sobre el nivel del sistema de transporte en su conjunto.

Adler y col (2010) en “High-speed rail and air transport competition: Game engineering as a tool for cost-benefit analysis” presenta una investigación donde desarrolla una metodología para evaluar las inversiones en infraestructura y sus efectos sobre los equilibrios de transporte teniendo en cuenta la competencia entre múltiples tipos de servicio de transporte. Los operadores, incluyendo trenes de alta velocidad, las compañías aéreas y compañías de bajo coste regionales, maximizan funciones de mejor respuesta a través de los precios, la frecuencia y tamaños de tren / avión, dada la dotación de infraestructuras, las funciones de costos y cargo ambiental. La metodología se aplica posteriormente a los 27 países de la Unión Europea, analizando específicamente cuatro de las redes transeuropeas prioritarias. En general se indica que la Unión Europea, de estar interesado en la maximización global del bienestar social, debe fomentar el desarrollo de la red ferroviaria de alta velocidad en toda Europa.

Evans (2010) plantea en “Rail safety and rail privatisation in Japan” que durante el período de 1980 hasta la actualidad, la situación económica de los sistemas ferroviarios de

muchos países desarrollados han cambiado, por la privatización o la desregulación de la economía, o ambos. Los objetivos principales de tales cambios han sido para mejorar el rendimiento económico de los ferrocarriles, y no cambiar el rendimiento de seguridad. No obstante, se reconoce que la modificación de la estructura organizativa de los ferrocarriles podría afectar a la seguridad. La evidencia empírica de los efectos de la reestructuración en la seguridad es limitada, tanto en Ferrocarriles como en otras industrias. En este trabajo se suma a la evidencia empírica mediante el análisis de los accidentes de tren en Japón, antes y después de la privatización de los Ferrocarriles Nacionales del Japón (JNR) en 1987. El documento encuentra que la JNR logra tendencias a la baja en el número promedio de accidentes de trenes por tren - kilómetro en los 16 años desde 1971 hasta 1986, y el documento tiene la extrapolación de estas tendencias favorables en el criterio para juzgar el desempeño de la seguridad de los ferrocarriles privatizados. El documento encuentra que el sistema ferroviario privatizado tenía menos accidentes de trenes en total, que este criterio en 1987-2006. Este hallazgo se aplica si se incluyen las operaciones de los trenes Shinkansen de alta velocidad. Por lo tanto no hay ninguna evidencia de que privatización de los ferrocarriles en Japón tuvo un efecto adverso sobre los accidentes de tren.

Dobruszkes (2011) en su artículo titulado “High-speed rail and air transport competition in Western Europe: A supply-oriented perspective” señala que el crecimiento del transporte aéreo cada vez más se plantea la cuestión de su impacto en el medio ambiente. Las autoridades públicas y los investigadores están confiando más y más en los trenes de alta velocidad (HSTs), cuya eficiencia se supone que debe llevar a un cambio modal de los aviones. Sin embargo, la mayoría de los estudios de transporte se centran en la evolución de la demanda y no la oferta, aunque es básicamente esta última la que determina el daño ambiental. A la luz de este hecho, el presente trabajo tiene como objetivo comparar la dinámica general de la oferta de transporte aéreo en Europa en comparación con el suministro de HST y examinar empíricamente cinco pares ciudades. El desarrollo del tren de alta velocidad sigue siendo limitado en comparación con el aumento de los servicios aéreos. Para un par de ciudades dado, el descenso en el número de vuelos depende de varias condiciones, incluyendo la duración del viaje HST y las estrategias adoptadas por las compañías aéreas. Algunas compañías reducen su oferta en cuanto al número de pasajeros, pero aumentan el número de vuelos con el fin de competir más eficazmente con los HSTs.

Yang y Zhang (2012) hace referencia en “Effects of high-speed rail and air transport competition on prices, profits and welfare”, a los efectos de la competencia entre el transporte aéreo y por ferrocarril de alta velocidad (HSR). Mientras que las compañías aéreas maximizan el beneficio, HSR puede maximizar una suma ponderada del beneficio y el bienestar social. Se demuestra que mientras que disminuye la tarifa aérea, y el costo del billete de tren aumenta, los pa-

sajeros deciden viajar en tren por sus comodidades. Por otra parte, la tarifa aérea disminuye en velocidad ferroviaria si el impacto del costo marginal HSR con respecto a velocidad ferroviaria no es demasiado grande. Bienestar en el sistema HSR puede ser más o menos alto con la discriminación de precios: En particular, mayor es la discriminación de precios cuando la diferencia de la ganancia de los viajes es suficientemente mayor que la diferencia de valor de tiempo entre los pasajeros de negocios y de placer. Finalmente, en un estudio numérico de los mercados de China se obtuvo que tanto el precio, como la frecuencia de programación se consideren como variables importantes al momento de decidir en qué medio viajar.

Givoni y Banister (2012) en “Speed: the less important of the High-Speed Train (HST)” señalan que en muchos países, el transporte ferroviario era la columna vertebral de la sistema de transporte, y un factor importante en el crecimiento de las ciudades. Luego perdió cuota de mercado significativa con respecto al uso del transporte aéreo. Más recientemente, con la creciente congestión, el uso del ferrocarril es de nuevo creciente. En algunos corredores de transporte, el ferrocarril de nuevo domina siendo el principal modo de elección, por ejemplo, entre Tokio y Osaka en Japón, y Londres y Manchester, en el Reino Unido. Este renovado interés por el ferrocarril está estrechamente relacionado con el desarrollo de la moderna Tren de Alta Velocidad, que ha convertido el ferrocarril en un nuevo modo rápido, práctico y de moda. En Europa (posiblemente la región más pro ferrocarriles del mundo fuera de Japón), HST ha aumentado su participación en la demanda desde el 15,9% de trenes de pasajeros - km en 2000 a 23,9% en 2008 (y el 62 % en Francia). Sin embargo, a pesar de este renacimiento del ferrocarril, el pasajero ferroviario representa sólo el 6,3 % del total de pasajeros- kilómetros (9,8 % en Francia) por debajo de 6,6 % en los países de la UE en 1995. Además, si bien la red HST ha más que duplicado en longitud entre 1995 y 2008, la red ferroviaria en su conjunto perdió cerca del 6% de sus líneas en ese período, las líneas y del HST todavía representan sólo el 3% de la red ferroviaria europea en 2008. En el paradigma actual de transporte, el tiempo de viaje es generalmente considerado pérdida de tiempo. Esto significa que el tiempo de viaje debe ser reducido al mínimo y, en consecuencia es necesario incrementar las velocidades, siendo esto un argumento que ha sido fundamental para la inversión en HST. “El tiempo es oro” y por lo tanto “más rápido es mejor” es un concepto central en el transporte planificación.

Socorro y Vicens (2013) basan su artículo “The effects of airline and high speed train integration” en un modelo teórico donde se analizan los efectos sociales y ambientales de la compañía aérea y la integración de HST en dos escenarios diferentes: los aeropuertos con limitaciones de capacidad y aeropuertos con la competencia de aerolíneas de bajo costo. Los méritos de este modelo teórico son dobles. En primer lugar, el modelo permite apoyar y calificar algunas de las predicciones empíricas realizadas por la literatura que

estudia la compañía aérea y la integración ferroviaria. En segundo lugar, el modelo puede proporcionar algunas ideas a los responsables políticos a fin de evaluar los posibles efectos de la aerolínea y la integración HST en situaciones de hipotéticas alternativas.

Tanaka (2014) en su artículo titulado “Transport in Japan” señala los problemas de movilidad de pasajeros que ha sufrido Japón en la última década, atribuyendo este cambio a factores socioeconómicos que traducen en una prolongada recesión, flexibilización de las regulaciones y una sociedad que envejece. También señala que la incorporación de la levitación magnética a través del Tren Serie L0 será el acontecimiento más importante en el transporte japonés después de la apertura de Shinkansen. Se espera para crear efectos socioeconómicos significativos, incluyendo los impactos positivos y negativos sobre el conjunto de la central de Japón a través de la zona a lo largo de la línea.

Inoue y col (2015) plantean en su artículo “Stated preference analysis to estimate the domestic transport demand following the future entry of LCCs and the inauguration of the Linear Chuo Shinkansen in Japan” la razón principal para la selección del modo de transporte es el bajo costo y por lo tanto los pasajeros eligieron las aerolíneas de bajo costo y los servicios de autobús express. Sin embargo si se considera el tiempo de recorrido, es una razón menos para la elección de los tipos de transporte antes mencionados. Sin embargo es importante destacar, que hay un mercado de clientes que debe viajar en un modo de transporte específico, independientemente del nivel de servicios para los medios de transporte seleccionables.

Jiang y Li (2016) en “Low cost carrier and high-speed rail: A macroeconomic comparison between Japan and Western Europe” señalan que tanto en Japón como en Europa se ha promovido los trenes de alta velocidad como un proyecto clave del gobierno, pero el gobierno europeo tiene una actitud más liberal hacia su sector de la aviación en comparación con los japoneses, lo que desalienta el sector de las líneas áreas de bajo costo en Japón. Existen factores, que se centran en el entorno de políticas regulaciones que podrían ser una importante fuerza impulsora en el desarrollo de una de las dos formas de transporte.

4 Planteamiento del Problema

Durante muchos años la alta velocidad ferroviaria ha sido un concepto técnico, propio de la industria, que se relacionada con la velocidad máxima que podían alcanzar los trenes en un determinado corredor, dependiendo de las características del diseño de la infraestructura y la tecnología utilizada en los vehículos.

El transporte ferroviario de alta velocidad está considerado como uno de los avances más significativos que se han desarrollado en el transporte terrestre de pasajeros a partir de la segunda mitad del siglo XX (Gutiérrez y col., 1996). A comienzos de 2008 existían en operación cerca de 10.000 kilómetros de nuevas líneas ferroviarias de alta ve-

locidad en todo el mundo, y globalmente, incluyendo las líneas convencionales que también utilizadas por el transporte ferroviario de alta velocidad, más de 20.000 kilómetros eran utilizados para suministrar servicios de alta velocidad a un creciente número de viajeros dispuestos a pagar por menores tiempos de viaje y mayor calidad en el transporte.

Solo en Japón, donde el concepto de tren bala apareció por primera vez en 1964, el transporte ferroviario de alta velocidad ha movido un promedio de 100 millones de pasajeros anuales en los últimos 40 años (Barron 2009).

El AnnualReport 2015 de JR Central señala que el sistema ferroviario japonés en su totalidad, incluyendo el grupo JR y otras empresas ferroviarias, abarca 127.902 kilómetros de operación. En 2015, la línea shinkansen del sistema ferroviario transportó a 157 millones de pasajeros.

En la actualidad, existen servicios de alta velocidad ferroviaria en más de 15 países de todo el mundo, aunque la red se está expandiendo rápidamente y se espera alcanzar 25.000 kilómetros de nuevas líneas antes de 2020. Plantean Jiang y Li (2016) que a pesar de estas cifras, construir, operar y mantener línea de alta velocidad resulta muy costoso, por eso precisa tener una visión clara y objetiva, capaz de ir más allá del indudable avance tecnológico y de las aparentes cifras de la demanda.

El TokaidoShinkansen cubre el trayecto de 500 km entre Tokio y Osaka, el cual ha sido considerado desde hace mucho tiempo la principal arteria de Japón. Los trenes de esta línea se desplazan a una velocidad máxima de 270 kilómetros por hora, y la duración mínima del recorrido entre Tokio y Osaka es actualmente de 2 horas y 25 minutos.

Desde su inauguración en 1964, el Shinkansen ha logrado un excepcional récord de funcionamiento a alta velocidad, seguridad, volumen de transporte y puntualidad. Hasta 14 trenes circulan cada hora en cada dirección, y la media de retrasos se sitúa entre tan solo 0,9 minutos. Además, no se ha producido ningún accidente mortal por colisión o descarrilamiento en ninguna línea Shinkansen desde que entraron en funcionamiento, lo que representa un récord de seguridad insólito (Lipsky y col., 2013).

Aunque los trenes de alta velocidad comparten los mismos principios de ingeniería del transporte que sustentan a los convencionales, también existen notables diferencias de un punto operativo. Por ejemplo los sistemas de señalización y guía difieren, la electrificación es completamente diferente, además, existen diferencias significativas en relación al material rodante y la explotación comercial de los servicios.

Hoy en día existe un problema global. La densidad poblacional va en aumento, y la ineficiencia del servicio de transporte urbano y la falta de infraestructura, contribuyen a la congestión en lo que a transporte de personas se refiere. En muchas ciudades, la congestión en el tráfico conduce a la pérdida de tiempo para el trabajo y el descanso, el aumento del consumo de gasolina y emisiones, y altos índices de accidentalidad.

La expansión de las ciudades obliga a muchas personas hoy en día a moverse por grandes distancias ya que se han ido construyendo casas en barrios, en pueblos alejados o en los alrededores de las ciudades. A esto se le suma también el alejamiento de las funciones de la vida diaria (trabajo, comercio, diversión, vivienda) en diferentes lugares de las ciudades. Esto significa, que en una parte de la ciudad las personas tienen su vivienda, en otra trabajan, en otra estudian, en otra realizan sus compras o los trámites de la administración municipal. En este sentido, la gran cantidad de kilómetros recorridos por día por una persona es alarmante.

Blow (2006) insiste en que las distancias que debe recorrer una persona, y los medios de transporte que utiliza, son de ninguna manera predefinida. Se ha podido comprobar que en el uso del transporte público colectivo: la calidad y comodidad del sistema define en buena parte la demanda.

En este orden de ideas, existe un elemento invisible, pero que resulta de gran importancia cuando se estudia el tema de la movilidad, y es el tiempo que invierten la persona en trasladarse de un lugar a otro. Es por esta razón que los ferrocarriles se están empleando día a día con más frecuencia en la principales ciudades del mundo.

En Japón, los servicios ferroviarios más importantes se han transformado gradualmente en transporte interurbano de larga distancia, como por ejemplo el Shinkansen, o en líneas de desplazamiento diario de cercanías. Las líneas de cercanías transportan a los usuarios desde las zonas periféricas de las ciudades al trabajo y la escuela, y de vuelta a casa. Debido al alto precio de la tierra, muchas personas se han mudado a áreas residenciales en las afueras de las ciudades en busca de viviendas asequibles. Más del 70% de los empleados de oficina actualmente se trasladan al trabajo diariamente en tren, y esos trenes con frecuencia están abarrotados de pasajeros, aunque el nivel de congestión en las horas punta en las principales líneas del área de Tokio se ha reducido al 180% de la capacidad normal, después de haber alcanzado su máximo en 1965 (Del Val 2012).

Actualmente, nueve ciudades de Japón tienen sistemas de metro. Al mes de marzo de 2011, la totalidad del sistema de metro abarcaba 857 kilómetros de operación. Hay 13 líneas de metro en Tokio, y normalmente transportan a 7 millones de pasajeros al día. Muchas de las líneas de metro también están conectadas con líneas ferroviarias de cercanías y extienden su servicio al extrarradio de las ciudades.

Japón continúa reconociendo las muchas ventajas que ofrece el transporte ferroviario, incluyendo la comodidad, eficiencia energética, bajo nivel de contaminación y alto grado de seguridad (Yasuo 2012). En las grandes zonas metropolitanas, los ferrocarriles desempeñan un papel primordial en el transporte y cuentan con un número de usuarios sumamente numeroso. Por consiguiente, JR y las líneas de empresas ferroviarias del sector privado continúan construyendo nuevas líneas e incrementando su capacidad, añadiendo tramos a las rutas existentes.

La expansión del sistema ferroviario también está

avanzando en lo que a velocidad se refiere (Barron 2008). Si los coches viajan a una mayor velocidad, emplean menor tiempo entre ruta y ruta, y esto se traduce en un aumento del volumen de pasajeros (Méndez y col., 2009). Es por ello que resulta importante, el estudio de las líneas de alta velocidad, y la incorporación de los trenes Maglev al sistema de transporte ferroviario japonés; pues si bien implican altos costos por la tecnología involucrada, esa inversión se traduce en un aumento del número de personas que transportan.

Con el crecimiento de la demanda experimentado en las dos últimas décadas, no está claro que la línea Tokaido sea capaz de satisfacer las necesidades de los usuarios en un futuro. Hay que tener en cuenta que ya existe un gran número de personas que escoge el avión para realizar este itinerario. Los casi 8 millones de usuarios del transporte aéreo, representan aproximadamente 22.000 usuarios diarios que podrían ser atraídos hacia este nuevo medio de transporte, más rápido y eficaz.

5 Discusión

La población de Japón se estima en alrededor de 126.573.481 millones de habitantes según estadísticas ofrecidas por la Oficina de Estadística del Ministerio de Asuntos Internos y Comunicación Japones (cifra que contempla hasta el mes de Diciembre de 2015), de ellos el 80% de la población vive con Honshū que es la isla principal del archipiélago japonés (JapanRailway & Transporte Review, 2014). Esta es la zona geográfica afectada por la Línea Tokaido.

La Línea Tokaido, contempla el tramo Tokio - Osaka, del cual, para los años 2013, 2014 y 2015 el que corresponde a Tokio y Nagoya fué cubierto en su totalidad (100%) por trenes operados por JR Central, y movilizó un total de 64 mil pasajeros al día (2013), 68 mil pasajeros al día (2014) y 74 mil pasajeros por día en 2015. No existen estadísticas de servicios de transporte aéreo en esta sección.

En el tramo Tokio - Osaka desde el año 2013 al 2015, en un 85% fué cubierto por servicio de trenes y un 15% por servicio aéreo. Para JR Central representa una movilización de aproximadamente de 102 mil pasajeros al día (2013), 108 mil pasajeros al día (2014) y 113 mil pasajeros al día en 2015 correspondencia del total de 121, 128 y 133 mil pasajeros al día respectivamente. Es decir, para 2013 19 mil pasajeros al día, 2014 y 2015, 20 mil pasajeros al día usaban el avión como medio de transporte en esta sección geográfica. Es importante señalar que para los años 2014 y 2015 no hubo incremento en el número de usuarios de los servicios aéreo, mientras que para shinkansen el incremento fue de 5 mil pasajeros al día.

En cuanto al tiempo de viaje es importante señalar que el servicio shinkansen en el tramo Tokio - Osaka que corresponde a 552,6 Km de operación poseía un tiempo de viaje de 2 horas 25 min (2013 y 2014) y 2 horas 22 min (2015), mientras que en avión has sido 2 horas 40 min (incluyendo el tiempo de traslado y acceso entre los centros

de las ciudades y aeropuertos) para todos los años estudiados (2013, 2014 y 2015).

Para 2013, el número de trenes diarios operativos era de 336. El promedio diario de pasajeros fué de 409 mil, lo cual se traduce a 149 millones de pasajeros anuales. Se registró también para este año una velocidad máxima de operación de 270 Km/h y un promedio de tiempo de retraso por tren de 0,5 minutos.

Para 2014, el número de trenes diarios operativos era de 342. El promedio diario de pasajeros fué de 424 mil, lo cual se traduce a 155 millones de pasajeros anuales. Se registró también para este año una velocidad máxima de operación de 270 Km/h y un promedio de tiempo de retraso por tren de 0,9 minutos.

Para 2015, el número de trenes diarios operativos era de 350. El promedio diario de pasajeros fué de 431 mil, lo cual se traduce a 157 millones de pasajeros anuales. Se registró también para este año una velocidad máxima de operación de 285 Km/h y un promedio de tiempo de retraso por tren de 0,6 minutos.

La línea shinkansen para el 2013, 2014 y 2015 poseía un promedio de 250 salidas y llegadas por día (considerando el tipo de servicio ofertado en las horas pico). El conjunto de areolíneas que ofertan en el servicio en esta ruta solo disponían de un total de 100 salidas y llegadas por día (2013), 108 salidas y llegadas por día (2014) y disminuyó a 106 salidas y llegadas por día en el 2015.

En el año 2015 hubo una fuerte inversión de capital (332 billones de yen = 33200 billones de dólares) parte de JR Central, lo cual repercutió en una mejora en las estadísticas de ese año fiscal.

Se infiere que este incremento en el número de usuarios en los años en estudio, es producto de las ventajas ofrecidas por el servicio Shinkansen, entre las cuales se destaca su tiempo de retraso; pudiendo notar que durante el año 2015 con respecto a 2014, se disminuyó 0,3 min.

Es posible notar que tal y como lo plantea Okamoto (2013), considerando que los tiempos de viaje son menores solo en unos pocos minutos que los ofrecidos por el transporte aéreo, el número promedio de salidas y llegadas durante el día ofrece un servicio más cómodo a los usuarios los cuales pueden disfrutar de horarios que se ajusten a sus necesidades. Esto incide directamente en que el porcentaje de pasajeros que emplean como medio de transporte los trenes shinkansen en comparación con el transporte aéreo sea mucho mayor.

6 Conclusiones

En el presente trabajo se hace una recopilación de los aspectos más importantes relacionados con el uso del tren de levitación magnética como alternativa del transporte masivo, lo cual es un área de importancia dado el incremento de la densidad de población y número de usuarios durante los años 2013, 2014 y 2015 en Japón.

En el desarrollo de la investigación se ha insistido sobre la importancia de la red Shinkansen a lo largo del desarrollo de la historia de la alta velocidad en el mundo. Cuando se inauguró TokaidoShinkansen en 1964, el sistema ferroviario estaba en declive, pues parecía estar perdiendo terreno en favor del automóvil o el avión.

En relación al desarrollo que ha vivido el Shinkansen en los últimos 50 años, hay que señalar que está marcado por el éxito de la Línea Tokaido, que llegó para solucionar los problemas de movilidad del volumen de pasajeros entre Tokio y Osaka. Fue una la línea construida en tiempo récord y que en pocos años de funcionamiento amortizó su inversión. Esto provocó un entusiasmo gubernamental que llevaba a la elaboración de un plan que preveía la construcción de 7.000 km de líneas de alta velocidad, considerando solo Japón. Nótese en relación a esto, que en la actualidad existen 10.000 km en todo el mundo.

Actualmente se encuentran en desarrollo varios proyectos de construcción de nuevas líneas, pues el análisis de los resultados obtenidos en función de la eficacia, eficiencia y rentabilidad de la alta velocidad (específicamente del uso de la tecnología Maglev), ha arrojado que es una de las mejores opciones para dar solución al problema del transporte de pasajeros en el mundo. Esto también ha contribuido a emplear distintas tecnologías en la configuración de las líneas o en las medidas de seguridad.

Con la entrada en escena de las compañías JapanRailways (JR) se incrementaron las prestaciones de los trenes a través de la implementación e investigación de nuevas tecnologías. Se podría decir, que sobre este aspecto tuvo gran influencia los alemanes y franceses; los cuales habían alcanzado mayores velocidades comerciales a través del desarrollo de nuevos trenes, que permitían un salto de calidad importante.

La privatización de JNR ha provocado que las compañías privadas, optimizando los recursos, busquen nuevas soluciones para expandir la red y mejorar las prestaciones ofrecidas a los usuarios. Para ello se han desarrollado ramas más rápidas y seguras y un servicio más frecuente.

La línea nació como solución a un exceso de demanda en el corredor: si se introducían trenes más veloces, la frecuencia también aumentaría y se podría transportar un mayor volumen de pasajeros.

En las demás líneas no se puede aplicar el mismo esquema que en la Tokaido, ya que no existe en todo el territorio japonés una zona tan habitada y con una demanda tan potente. Es por ello que en las líneas Sanyo y Tohoku la preocupación principal no es la gran demanda que hay que satisfacer, sino el hecho de poder ofrecer un servicio que pueda competir con el transporte aéreo. Se trata de largas distancias a cubrir, por lo que interesan grandes separaciones entre estaciones. Es por ello que JR West y JR East están potenciando los servicios expresos (Nozomi y Hayate) con mayores distancias entre paradas y la posibilidad de alcanzar las velocidades máximas.

En cuanto a las demás líneas (Joetsu, Hokuriku y Kyushu), son casos diferentes a los anteriores. Aquí no se fomentan tanto los servicios rápidos o directos. Al recorrer zonas con localidades de menor envergadura, no se están uniendo dos grandes focos en origen y destino. Interesa más permitir al máximo número de personas acceder al servicio, que ofrecer viajes más cortos. Esto se puede hacer porque las distancias no son tan elevadas como en las líneas precedentes.

Se observa entonces, que en un mismo país existen tres modelos de gestión de alta velocidad completamente distintos, dependiendo de la demanda, los objetivos del operador y otros condicionantes.

Por último mencionar la posibilidad de ampliar la red Shinkansen en el territorio Japonés. Observando un mapa y considerando las obras que están en curso o en proyecto, no parece que sea especialmente necesaria la construcción de alguna línea nueva. Lo que sí puede tener sentido es conectar alguna zona más aislada, como puede ser Shikoku o el noroeste de Honshu, mediante Mini-Shinkansen, como los existentes en Akita y Yamagata. Otra opción que también puede valer es la de trenes de rodadura desplazable, que puedan circular tanto por ancho internacional como por ancho métrico.

Se facilitaría así el acceso a la red Shinkansen de zonas con baja conectividad actualmente. Sin embargo, la demanda no justificaría la construcción de una línea completamente nueva. Dónde sí que apoyaría una línea nueva es en la conexión de Hokkaido con las demás islas. Se uniría a Sapporo, quinta ciudad más poblada de Japón, con la capital, pudiendo competir directamente con el transporte aéreo.

En el caso del tren de levitación magnética (Maglev) entre Tokio y Osaka, esta línea nace por cuestiones de capacidad. No parece que con la tecnología actual la línea Tokaido pueda ofrecer servicios aún más frecuentes. Es por ello que JR Central previó que en un futuro próximo se pudiera llegar a saturar la línea si la demanda aumenta. Por esta razón se propuso el ChuoShinkansen, que va a unir ambas ciudades en apenas una hora.

Es posible entonces concluir que el uso de trenes de alta velocidad específicamente los basados en tecnología de levitación magnética representan una amenaza dentro del mercado referido al transporte masivo de pasajeros (en especial el transporte aéreo), pues ofrecen comodidad, seguridad, disponibilidad y tiempo de viaje menor, características que hacen que al momento de escoger entre el avión y el tren, el pasajero tienda a preferir los servicios del tren.

Referencias

- Adler N, Pels E, Nash C, 2010, High-speed rail and air transport competition: Game engineering as tool for cost-benefit analysis, *Transportation Research Part B*, 44, 812–833.
- Baohua M, Rong H, Shunping J, 2008, Potential applications of Maglev railway technology in china. *Journal of*

- Transportation Systems Engineering and Information Technology, 8, 29-39.
- Barone A, 1995, Why superconductive detectors?. Nuclear Physics B - Proceedings Supplements, 44, 1-3.
- Barrón I, 2008, High speed lines in the World, Informe de "UIC: High-Speed Department". Actualizado a día 3 de marzo de 2008.
- Blow L, 2006, MAGLEV el nuevo modo de transporte para el siglo 21. Retrieved Marzo/10, 2014, from <https://www.21stcenturysciencetech.com/articles/Summer03/Maglev2.html>.
- Central Japan Railway Company, Annual Annual Report 2015.
- Cho H, Sung H, Sung S, You D, Jang S, 2008, Design and Characteristic Analysis on the Short-Stator Linear Synchronous Motor for High-Speed Maglev Propulsion, IEEE Transport Magnetic, 44, 67-82.
- Del Val Y, 2012, Nuevos trenes a mayor velocidad para la línea con más viajeros del mundo entre Tokio y Osaka. *Vía Libre*, 467, 213-218.
- Dobruszkes F, 2011, High-speed rail and air transport competition in western europe: A supply-oriented perspective. *Transport Policy*, 18, 870-879.
- Doi T, 2003, Technology research and development at JR Central. *Japan Railway & Transport Review*, 36, 112-118.
- Evans A, 2010, Rail safety and rail privatisation in japan. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 1296-1301.
- Fana J, Malozovsky Y, 2013, The origin of superconductivity. *Physica C*, 493, 12-14.
- Givoni M, Banister D, 2012, Speed: The less important element of the high-speed train. *Journal of Transport Geography*, 22, 306-307.
- Guo Y, Jin J, Zhu J, Lu H, 2007, Design and Analysis of a Prototype Linear Motor Driving System for HTS Maglev Transportation, IEEE Transport. Application Superconductivity, 17, 202-211.
- Gutierrez J, González R, Gómez G, 1996, The european high-speed train network. *Journal of Transport Geographic*, 4(4), 227-238.
- Hood C, 2006, Shinkansen: From bullet train to symbol of modern Japan. Routledge Editions, ISBN 0-415-44409-8. *Japan Railway & Transporte Review* http://www.jrtr.net/jrtr27/pdf/s48_ter.pdf, 22/03/2014.
- Inoue G, Ono M, Uehara K, Isono F, 2015, Stated-preference analysis to estimate the domestic transport demand following the future entry of LCCs and the inauguration of the Linear Chuo Shinkansen in Japan. *Journal of Air Transport Management* 47, 199-217.
- Jiang C, Li X, 2016, Low cost carrier and high-speed rail: A macroeconomic comparison between Japan and Western Europe. *International Journal of Transport Management*, 2(2), 89-98.
- Kasai Y, 2000, A history of the development of japanese railway networks. *Japan and the World Economy*, 12, 89-93.
- Knutton M, 2004, Japan celebrates the birth of high-speed rail. *International Railway Journal*, 44, 238-247.
- Lee H, Kim K, Lee J, 2006, Review of Maglev Train Technologies, IEEE Transport Magnetic, 42, 2245-256.
- Laithwaite E, Barwell F, 1964, Linear induction motors for high-speed railways, *Electronics and Power*, 16, 87-95.
- Lipsy P, Schipper L, 2013, Energy efficiency in the Japanese transport sector. *Energy Policy*, 56, 248-258.
- Luu T, Nguyen D, 2005, The train of the future. Fifth Annual Freshman Conference, Pittsburgh (EE.UU.), Abril.
- Magnetic levitation (Maglev) technologies. (2000). Retrieved Mar-
zo/31, 2014, from http://www.jrtr.net/jrtr25/pdf/f58_tec1.pdf
- Méndez J, De Rus G, Barron I, 2009, El transporte ferroviario de alta velocidad. Retrieved Marzo/31, 2014, from www.fbbva.es/TLFU/dat/DT_03_09_transporte_ferroviano_web.pdf
- Okamoto I, 2013, Shinkansen bogies. Retrieved Marzo/31, 2014, from <http://www.jrtr.net/jrtr19/pdf/Technology.pdf>
- Oura Y., Mochinaga Y., Nagasawa H. (1998). Railway electric power feeding systems. *Japan Railway & Transport Review*, 16, 65-74.
- Pérez J, García J, Díaz J, 2009, Mechanics of a magnet and a meissner superconducting ring at arbitrary position and orientation. *Physica C*, 469, 252-255.
- Quan-Sheng S, Guangfeng Ch, Susta J, Hull J, Fesmire J, Augustanowicz S, Demko J, Werfel F, 2012, Magnetic levitation technology and its applications in exploration projects. *Physics Letters A*, 376(42-43), 2739-2742.
- Raghunathan R, Kim H, Setoguchi T, 2002, Aerodynamics of high-speed railway train. *Progress in Aerospace Sciences*, 38, 469-514.
- Román C, Espino R, Martín J, 2007, Competition of high-speed train with air transport: The case of Madrid-Barcelona. *Journal of Air Transport Management*, 13, 277-284.
- Sato S, Kato M, 2004, Fluxons in superconductive networks. *Physica C: Superconductivity*, 412-414, 262-265.
- Schafer A, Victor D. (2000). The future mobility of the world population. *Transportation Research Part A*, 34, 171-205.
- Smith R, 2003, Japanese shinkansen: Catalyst for the renaissance of rail. *Journal of Transport History*, 24, 68-76.
- Smith R, 2014, The Shinkansen—World leading high-speed railway system. *Japan Railway & Transport Review*, 64, 38-49.
- Socorro M, Vicens M, 2013, The effects of airline and high speed train integration. *Transportation Research Part A*, 49, 160-177.
- Soejima H, 2003, Railway technology in Japan – Challenges and strategies. *Japan Railway & Transport Review*, 36, 65-78.
- Sone S, 2001, Japan's rail technology development from 1945 to the future. *Japan Railway & Transport Review*, 27, 231-238.
- Spielmann M, De Haan P, Scholz R, 2008, Environmental

- rebound effects of high-speed transport technologies: A case study of climate change rebound effects of a future underground Maglev train system. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1388-1398.
- Suga T, 2003, High-speed railways in Japan: A short history and current topics. Retrieved Marzo/15, 2014, from <http://english.jr-central.co.jp/>.
- Takatsu T, 2007, The history and future of high-speed railways in Japan. *Japan Railway & Transport Review*, 48, 263-271.
- Tanaka K, 2014, Transport in Japan. *Journal of Transport Geography*, 34, 305-306.
- Thornton R, 1975, Magnetic levitation and propulsion, *IEEE Transport Magnetic*, 44, 123-129.
- Wako K, 2000, Magnetic levitation (Maglev) technologies, *Technology Review*, 50, 16-28.
- Wakuda Y, 1997, Railway Modernization and Shinkansen. *Japan Railway & Transport Review*, 11, 116-124.
- Yang H, Zhang A, 2012, Effects of high-speed rail and air transport competition on prices, profits and welfare. *Transportation Research Part B*, 46, 1322-1333.
- Yasuo S, 2012, Social change and future transport policy in the Japanese context. *IATSS Research*, 35, 56-61.

Noguera Gottberg, María Alejandra: *Ingeniero Mecánico, Magíster en Gerencia Empresarial, Líder de Sistemas de Gestión Calidad y Mejoramiento Continuo de POCH by WSP.*

Caracterización sedimentológica y estratigráfica de las secciones aflorantes en los sectores Los Naranjos, La Villa y quebrada Boquerón, de Canaguá, estado Mérida

Alarcón, Viviam^{1*}; Castillo, María¹; Rivero, María²; Guerrero, Omar³; Guerrero, Ersy⁴

¹Núcleo Pedro Rincón Gutiérrez, Universidad de Los Andes

Mérida, Venezuela

*viviamalarcon_57@hotmail.com

Resumen

*Al pasar de los años, la geología de la cobertura sedimentaria del Flanco Surandino en Venezuela ha sido objeto de investigación con la finalidad de caracterizar y delimitar las unidades geológicas presentes, además de contribuir con la actualización de la cartografía nacional. En esta investigación, se lograron definir las secciones estratigráficas aflorantes en los sectores Los Naranjos, La Villa y quebrada El Boquerón de Canaguá - Estado Mérida, a través de la siguiente metodología: 1) recolección y análisis de información base 2) descripción de afloramientos y recolección de muestras en la etapa de campo 3) desarrollo de análisis petrológicos, petrográficos y bioestratigráficos. A partir de esta información, se elaboró un código de facies, agrupándolos en asociaciones de facies para establecer sub-ambientes dominantes, concluyendo que en el sector Los Naranjos se definen depósitos de prodelta, para el sector La Villa se observan depósitos de frente deltaico, mientras que el sector quebrada El Boquerón está compuesto, en su totalidad, por asociaciones de facies que definen la llanura deltaica. Las biozonas de la *Oolinasp*, *Globorotaliaehrenbergi* y *Globanomalina pseudochapmani* permitieron establecer una edad Campaniense-Luteciense para las secciones aflorantes en su totalidad, según las especies de foraminíferos y polen encontrados en el sector Los Naranjos y La Villa respectivamente, estableciendo el límite Cretácico-Terciario o límite K/T en el área de estudio. El modelo de ambiente sedimentario propuesto corresponde a un ambiente deltaico progradante dominado por ríos; y la diferenciación de las unidades fue establecida a partir de comparaciones litológicas, paleontológicas y paleoambientales, concluyendo que la sedimentación Cretácica corresponde a la Formación Colón/Mito Juan, el Paleoceno a la Formación Barco y el Eoceno a la Formación Misoa.*

ISBN: 978-980-11-1858-9



9 789801 118589

1 Introducción

La geología de la cobertura sedimentaria del Flanco Surandino en Venezuela, ha sido objeto de investigación con fines exploratorios, enfatizando en los estudios de geología de superficie para lograr modelos descriptivos que permitan caracterizar las unidades geológicas presentes y, de esta forma, comprender los sucesos que dieron origen a las mismas, a lo largo del tiempo geológico. Así, Petróleos de Venezuela-PDVSA, a partir del año 1980, comenzó a desarrollar, en el Flanco Surandino, levantamientos locales que integraran, además de la geología de superficie, datos de geoquímica e información de subsuelo a través de estudios sísmicos, con el fin de establecer una estrategia exploratoria que genere un menor número de gastos (Escalante y col., 2011). Sin embargo, en la región de Canaguá, Municipio Arzobispo Chacón (estado Mérida) existen pocas bases teóricas que sustenten las condiciones sedimentológicas y estratigráficas bajo las cuales se depositaron las distintas unidades geológicas aflorantes en la zona, específicamente en los sectores Los Naranjos, La Villa y quebrada El Boquerón. Los trabajos realizados en el área se limitan a los publicados por Smith (1962), Shagam (1969) y Briceño y Montilva (2014) quienes reconocieron, principalmente, formaciones paleozoicas y mesozoicas, basándose únicamente en rasgos litológicos, los cuales fueron plasmados en mapas geológicos/estructurales del sector.

Con respecto a la cronoestratigrafía del Flanco Surandino, González de Juana (1980), establece que en el Paleoceno y Eoceno inferior estas zonas de Venezuela, incluyendo la cuenca Barinas-Apure, no presentan sedimentación, a causa de una elevación generalizada del borde septentrional del Cratón de Guayana, lo que ocasionó una retirada extensa de los mares hacia el norte generando un periodo de intensa erosión a raíz de la exposición del terreno, a su vez, esto ocasiono la posterior depositación de sedimentos bajo condiciones deltaicas, los cuales no han sido estudiados a profundidad en el área. Esta es una de las razones por la cual surge la necesidad de realizar una nueva caracterización sedimentológica y estratigráfica detallada de los depósitos de las secciones aflorantes, además de la falta de diferenciación de las unidades geológicas expuestas en la más reciente publicación cartográfica de la zona de estudio, la cual corresponde al mapa geológico realizado por Briceño y Montilva (2014).

2. Marco Teórico

2.1. Ubicación del área de estudio

El área de estudio se encuentra al occidente de Venezuela, en Los Andes venezolanos, al sur del estado Mérida, en el municipio arzobispo Chacón, específicamente en el Poblado de Canaguá conocido como Libertad (Figura 1). Esta zona posee aproximadamente un área de 5 Km² y se encuentra comprendida en la carta topográfica 5940-III-NO

de la dirección de cartografía nacional a escala 1:25.000; específicamente el área de investigación se encuentra enmarcada en una nueva delimitación realizada a través del software ArcGis, partiendo de los datos obtenidos de la fotointerpretación del área. (Figura 2).



Figura 1: Ubicación del área de estudio. Tomado y modificado de CNE (2008) y Briceño y Montilva (2014)

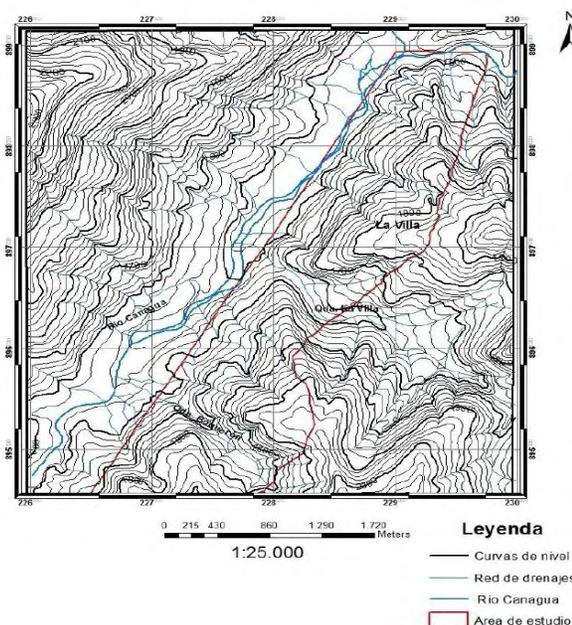


Figura 2: Delimitación del área de estudio.

3. Procedimiento Experimental

El siguiente estudio, se basa en una investigación exploratoria y descriptiva, a través de análisis sedimentológicos, estratigráficos, petrológicos y micropaleontológicos, para obtener tener como resultado, la caracterización de las secciones aflorantes en los sectores Los Naranjos, La Villa

y quebrada El Boquerón, de Canaguá, Estado Mérida. A su vez, esta investigación constituye un aporte sustancial para la geología en los Andes venezolanos, específicamente en el flanco Surandino.

3.1 Etapa I y II: Recopilación y Análisis de información base

Esta etapa consistió en la búsqueda, recolección y estudio de antecedentes referentes a la investigación propuesta, entre los cuales destacaron la revisión bibliográfica, la búsqueda de cartografía de la zona y fotografías aéreas. Se utilizó el mapa topográfico existente en el área, facilitado por el Instituto Nacional de Geología y Minería (INGEOMIN) a una escala 1:25.000, correspondiente a la carta 5940-III-NO (Libertad) del año 1977, realizado por la Dirección de Cartografía Nacional. Así mismo, las fotografías aéreas fueron suministradas por el Laboratorio de Fotogeología y por la mapoteca de la Facultad de Geografía de la Universidad de Los Andes fueron las correspondientes con la Misión A34, Hoja 9, Fajas 5(48-52) y 6(130A-134A) a una escala 1:40.000 realizadas en el año 1952 y, en cuanto a la revisión bibliográfica, se consultaron los trabajos realizados por Shagam (1972) en el Tomo II del IV Congreso Geológico Venezolano y, el más relevante consultado para esta investigación, fue el realizado por Briceño y Montilva (2014), denominado Cartografía Geológica de Superficie de la región de Canaguá (Hoja CN-5940-III-NO) municipio Arzobispo Chacón, estado Mérida – Venezuela.

Etapa III: Campo

Esta etapa constituye una de las más importantes de la investigación, la cual constó básicamente de 5 pasos: análisis sedimentológicos, bioestratigráficos, definición de modelo sedimentario y análisis paleogeográficos. En esta se seleccionaron los afloramientos de interés según su grado de meteorización, disposición de los estratos y características representativas como lo es el color, textura, granulometría, litología, estructuras sedimentarias visibles, entre otras. Se recolectaron las muestras que posteriormente fueron analizadas con rigurosidad.

Etapa IV: Resultados y Análisis de resultados Análisis sedimentológicos

Estos consistieron en el procesamiento de la información recolectada directamente en campo. Entre las características analizadas para la elaboración del código de facies se tienen: las coloraciones frescas y meteorizadas de las rocas, las cuales permiten inferir los minerales existentes; la geometría de los estratos los cuales muestran el tipo de energía y dirección de la corriente de sedimentación; las estructuras sedimentarias que muestran los procesos físicos, químicos y biológicos ocurridos al momento de la depositación de la roca; el contenido fósil, que indica las condiciones ambientales que existieron al momento de la depositación, entre otros. A través del análisis de estos parámetros se obtuvieron los paraciclós y ciclos sedimentarios para determinar los periodos de progradación o retrogradación que tomaron lugar en el área y, posteriormente, se digitalizaron

las columnas estratigráficas levantadas, a través del software SedLog, incorporando en ellas los parámetros generales de facies. Así mismo, dentro de estos análisis, se realizaron los siguientes estudios:

Análisis macroscópico de muestras

Para realizar una buena descripción petrológica, a partir de las muestras recolectadas, primeramente, se definieron, con la ayuda de la lupa de mano, parámetros como el color, morfología de los granos, estructuras sedimentarias (visibles), composición mineralógica, aspecto general de la muestra, alteraciones (fracturas, oxidación, meteorización) y, de ser posible, darle el nombre a la roca basándose en las características observadas.

Análisis petrográfico

La elaboración de las secciones finas fue realizada en los laboratorios de PDVSA La Concepción, en la ciudad de Maracaibo, estado Zulia, en donde se realizaron los respectivos tacos o prismas, para posterior realización de las cinco secciones finas utilizadas en el trabajo. Luego, se pudo llevar a cabo el análisis de las muestras en el laboratorio de Petrografía de la escuela de Ingeniería Geológica de la Universidad de Los Andes, utilizando un microscopio marca Nikon modelo Eclipse E200. Para la clasificación de las rocas, en este caso siliciclásticas, se tomó en consideración el contenido mineralógico, así como también los elementos texturales como redondez, selección, escogimiento, madurez textural y mineralógica, y tamaño de grano. Por otro lado, se utilizó la clasificación de rocas propuesta por Dott (1964), en la que se toman en cuenta dos criterios principales; la proporción de matriz, la cual considera cualquier material clástico (de tamaño inferior a 30 micras) independientemente de su origen, sin considerar otros componentes intersticiales como pueden ser los cementos y, por otro lado, la composición de granos de arena, que forman parte del esqueleto: cuarzo, fragmentos de roca y feldespatos. Además, también se consideró la clasificación de Folk (1968), la cual se basa en la abundancia relativa de cuarzo (Q), feldespatos (F) y fragmentos de roca (FR).

Análisis Bioestratigráfico

Es importante destacar que, en esta investigación, los métodos empleados consistieron en la búsqueda de polen y esporas (palinología) y foraminíferos, con el fin de establecer una edad concreta de las secciones estudiadas. Los lugares seleccionados para realizar la extracción de microfósiles corresponden a sitios donde se tiene sedimentación fina a lo largo de las secciones estratigráficas escogidas (lutitas), debido a que, en estos intervalos, es donde se acumulan la mayor cantidad de especímenes por ser zonas de depositación tranquila, así mismo, se utilizaron bolsas limpias y resistentes para mantener las muestras lo más protegidas y menos contaminadas posible.

Paleobatimetría

En la presente investigación, se determinó la paleobatimetría a través cada una de las especies bentónicas exis-

tentes, ya que los foraminíferos bentónicos son excelentes marcadores paleobatimétrico (Alegret 2008) para así lograr una ubicación precisa del ambiente. La clasificación utilizada para la determinación paleobatimétrica fue la propuesta por Hedgpeth, 1957 e Ingle, 1975 modificada por Giffuni (2000), observando la coincidencia de los rangos de profundidad de cada especie bentónica según el nicho de supervivencia.

Definición de ambiente sedimentario

Con el fin de proponer un modelo de ambiente sedimentario concreto que explicara el origen y depositación de los sedimentos en el área de estudio se procedió a indagar a través de comparaciones ambientales y estratigráficas definidas por diversos autores

Primeramente, se analizaron las litologías existentes a lo largo de las columnas estratigráficas levantadas, primero en el sector Los Naranjos, luego en el sector La Villa y por último en el sector quebrada El Boquerón. Seguidamente, se analizó el tipo de contenido fósil (polen, esporas o foraminíferos) o si las rocas carecían del mismo, para determinar las condiciones de depositación. A su vez, se tomó en cuenta la granulometría, estratocrecencia, geometría de los estratos y estructuras sedimentarias con la finalidad de establecer los elementos de arquitectura presentes y, con ello, el subambiente para cada tramo en la columna estratigráfica con el objetivo de establecer una correlación estratigráfica en los tres sectores del área de estudio.

4 Discusión y Resultados

4.1 Sedimentología

El levantamiento estratigráfico se realizó a lo largo de los sectores Los Naranjos, La Villa y la quebrada El Boquerón. Se analizaron un total de catorce afloramientos, dentro de los cuales se tienen seis en el sector Los Naranjos (LNAFL1, LNAFL2, LNAFL3, LNAFL4, LNAFL5, LNAFL6), siete en el sector La Villa (LVAFL1, LVAFL2, LVAFL3, LVAFL4, LVAFL5, LVAFL6) y dos en el sector quebrada El Boquerón (QBAFL1, QBAFL2). La ubicación de cada uno de ellos se muestra en la Figura 3.

Sector Los Naranjos

Se describieron cada uno de los afloramientos para establecer una caracterización geológica de campo, donde se observaron litologías del tipo de areniscas, lutitas y limolitas intercaladas entre los estratos. Se elaboró la columna estratigráfica compuesta para este sector, haciendo uso del software SedLog, en la que se representó las características sedimentológicas más importantes con la finalidad de reforzar interpretaciones y definir aspectos cronoestratigráficos como se muestra en la Figura 4, donde se puede apreciar claramente que las facies más finas predominan en la base y tope de la columna.



Figura 3. Ubicación de los afloramientos levantados en la etapa de campo. Corresponde a los sectores Los Naranjos, La Villa y la quebrada Boquerón, editada a través del software Google Earth.

Sector La Villa

Se llevó a cabo la descripción sedimentológica y estratigráfica de seis secciones estratigráficas, gran parte de estas dispuestas a un lado de la quebrada La Villa. Al igual que en el sector Los Naranjos, también se observaron grandes espesores de areniscas y lutitas intercalados con limolitas en algunas partes. Posterior a las descripciones realizadas en este sector se tuvo como resultado una columna estratigráfica compuesta, con espesor aproximado de 157 metros la cual se muestra en la Figura 5.

Sector quebrada El Boquerón

A lo largo de esta quebrada solo se encontraron expuestas dos secciones estratigráficas debido a que el área posee una amplia cobertura vegetal, sin embargo, fue posible la observación de características litológicas similares a las encontradas en los sectores Los Naranjos y La Villa. Posteriormente, se realizó la respectiva columna estratigráfica (Figura 6).

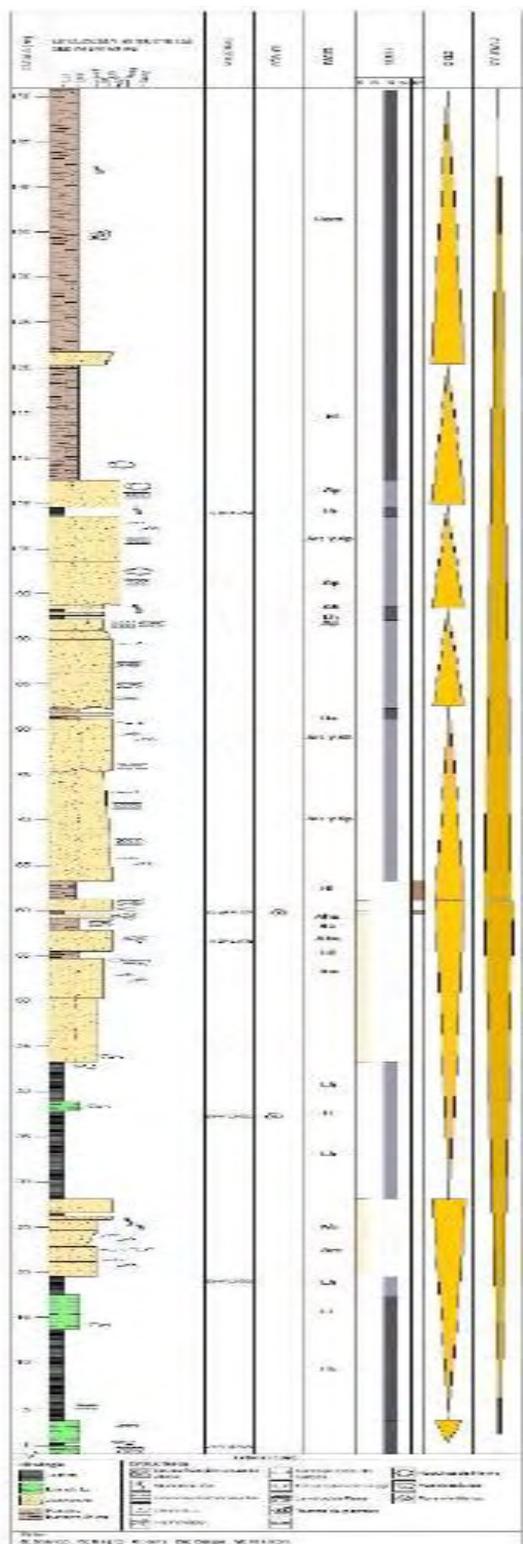


Figura 4. Columna estratigráfica correspondiente al sector Los Naranjos.

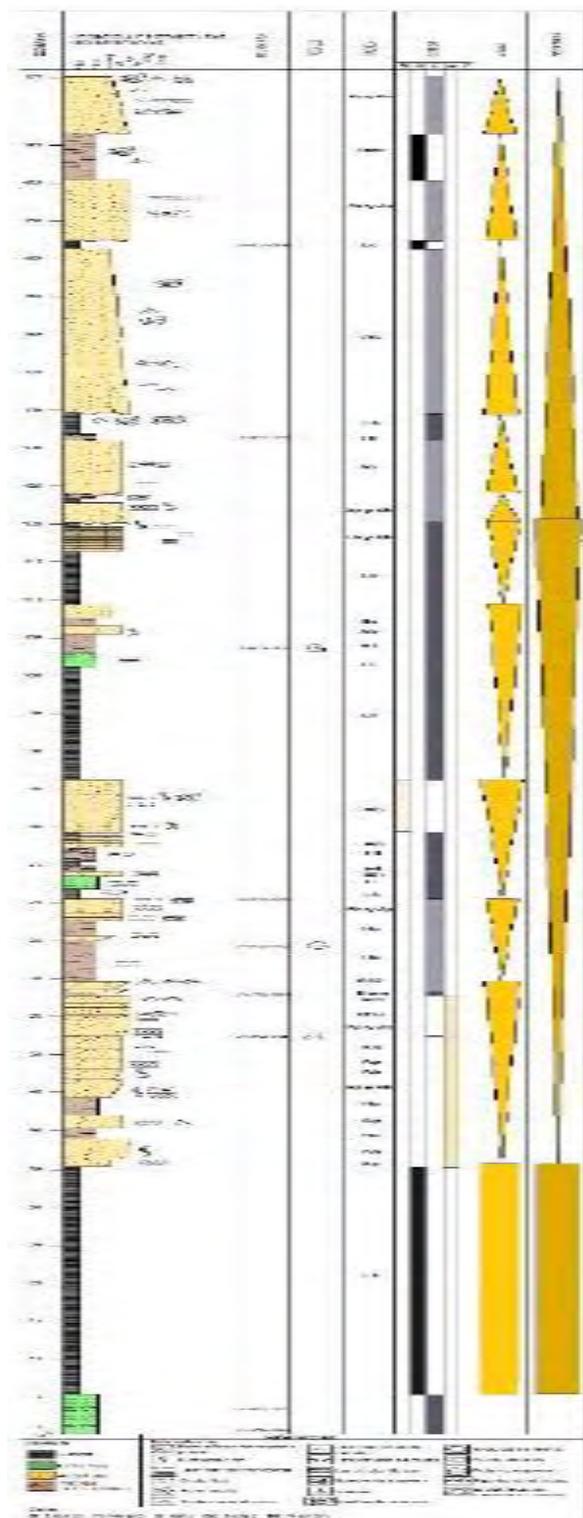


Figura 5. Columna estratigráfica del sector La Villa.

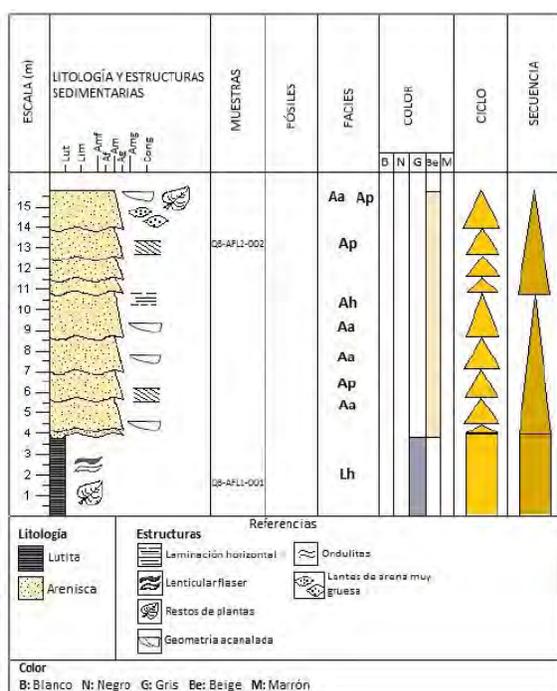


Figura 6. Columna estratigráfica del sector quebrada El Boquerón. En esta se representa de base a tope una secuencia agradante y dos retrogradantes.

4.2 Análisis petrográfico

Las muestras de roca escogidas para realizar las secciones finas y respectivos análisis petrográficos son ejemplares representativos de las distintas rocas encontradas en cada uno de los sectores del área de estudio, obteniendo así, una muestra característica para el sector Los Naranjos, dos para el sector la Villa y dos para el sector quebrada El Boquerón. Los resultados serán presentados por cada sector, en un formato resumen, en el cual se detallan los componentes principales de la muestra, observaciones y la clasificación respectiva de la roca, junto con la fotografía de la sección fina.

Sector Los Naranjos. Muestra LN- AFL4-004

Sector La Villa.

Muestra LV- AFL1 002

Muestra LV-AFL6-009

Sector quebrada El Boquerón

Muestra QB-AFL1-001

Muestra QB-AFL2-002

4.3 Bioestratigrafía

Para realizar el análisis bioestratigráfico correspondiente a las secciones aflorantes en los sectores Los Naranjos, La Villa y quebrada El Boquerón, se tomó en cuenta el contenido de foraminíferos y de polen y esporas, con el fin de establecer una edad relativa de las unidades geológicas estudiadas.

Las secciones del sector La Villa fueron datadas gracias al descubrimiento de las especies de polen *Foveotrites margaritae* (Rull, 1997) y *Tetracolporites brevicolpus* (Saxena et. al 1996) observadas en la figura 7, halladas en las muestras LV-AFL3-005 y LV-AFL4-007, permitieron definir una edad paleocena. Además, Por otra parte, la aparición del fósil *Psilamonocolpites medius* (Rull, 1997) en la muestra LV-AFL2-003 (Figura 8) permitió establecer una edad de Paleoceno - Eoceno Medio. En base a esto, se logró establecer que para la sección perteneciente al sector La Villa el rango cronoestratigráfico corresponde al Paleoceno – Eoceno Medio



Figura 7. Fósiles identificados en la muestra LV-AFL4-007 que determinan la edad Paleoceno; estos además se encuentran en la muestra LV-AFL3-005



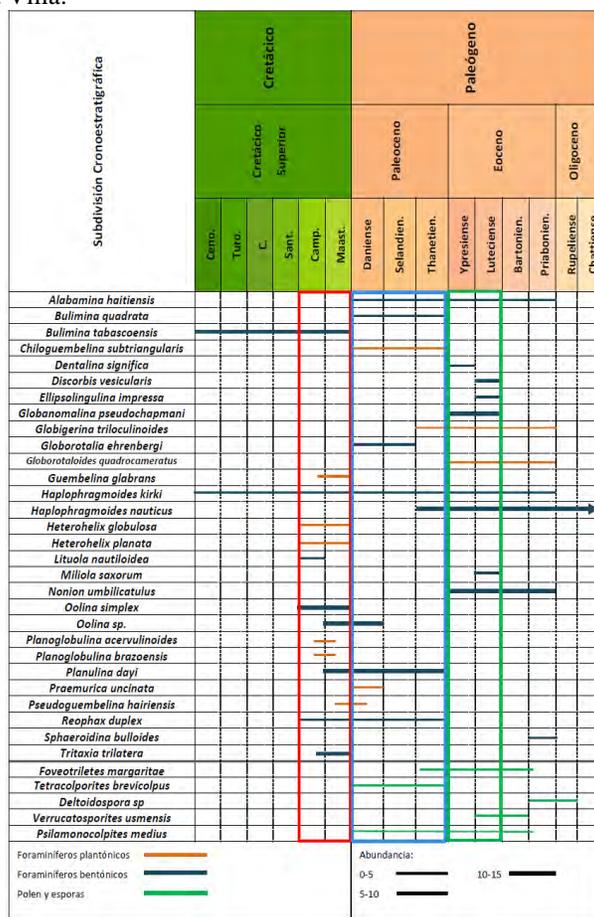
Figura 8. Fósil *Psilamonocolpites medius*, correspondiente a la muestra LV-AFL2-003.

Continuando con el sector Los Naranjos, la recuperación de polen y esporas para estudios bioestratigráficos no fue óptima, es decir, poca o nula. Debido a esto, se estableció la edad de las secciones levantadas a través de la búsqueda de foraminíferos, encontrándose la gran mayoría de estos, en la muestra LN-AFL3-003, así como también unos pocos en la muestra LN-AFL5-005. Así, se lograron recolectar e identificar un total de 154 ejemplares de foraminíferos agrupados en 29 especies predominando los organismos bentónicos sobre los planctónicos.

Por otro lado, se realizó una carta de distribución faunal la cual refleja la edad de cada una de las especies de polen, esporas y foraminíferos encontradas en las secciones

levantadas (Tabla 1), obteniendo los biohorizontes de primera aparición (BPA) y de última presencia (BUP) para cada taxón; los cuales se agruparon en tres biozonas de conjunto: Biozona de la *Oolina simplex*, Biozona de la *Globanomalina pseudochapmani* y Biozona de la *Globorotalia Ehrenbergi*.

Tabla 1. Carta de distribución faunal de las especies de foraminíferos y palinomorfs en los sectores Los Naranjos y La Villa.



Como se expuso anteriormente, existe un claro predominio de las especies bentónicas sobre las planctónicas, por lo cual se propone que se debe, en parte, a la gran extinción masiva que rige la fauna y flora en el tránsito Cretácico - Terciario o límite K/T, ya que Ignacio, Arz y Molina (2000) indican que la extinción de las especies de foraminíferos bentónicos no fue muy relevante en comparación con la de las especies planctónicas, conservándose la mayoría de los géneros bentónicos del Cretácico. Esto se produce, a raíz de que los autores en su mayoría, aceptan la hipótesis del impacto de un meteorito en la península de Yucatán, México, como la principal causa de la extinción masiva y de las concentraciones anómalas de iridio, cuarzos de choque y microesférulas en el límite K/T (Alegret, 2008), por lo que esto dio como resultado la acidificación del agua de los

océanos; la atmósfera terrestre se calentó y, como consecuencia, el nitrógeno de la misma se oxidó y formó ácido nítrico, además, como el impacto del asteroide tuvo lugar sobre materiales ricos en yeso, se liberó ácido sulfúrico que provocó la mayoría de las extinciones en el medio marino. Todo esto contribuyó al descenso del pH en las aguas de los océanos, afectando especialmente a las aguas superficiales, explicando así la extinción de muchos organismos de conchas carbonatadas que flotan en las aguas superficiales (especies planctónicas), ya que estas se disolverían al disminuir el pH.

En lo que respecta al sector quebrada El Boquerón, las muestras resultaron estériles, debido a que no presentaron ningún tipo de contenido floral ni faunal, por lo que la datación para dicho sector se realizó a partir de litocorrelación.

4.4 Paleobatimetría

Partiendo de la premisa de que los foraminíferos bentónicos son excelentes marcadores paleobatimétricos (Alegret 2008), se determinó la paleobatimetría para cada una de las especies bentónicas encontradas para así lograr una ubicación precisa del ambiente marino. Como se pudo observar, la mayoría de las especies coinciden en un ambiente comprendido entre nerítico interno y batial medio (Figura 9).

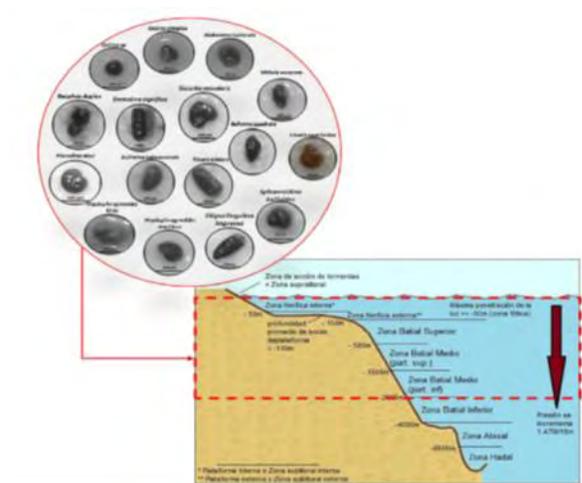


Figura 9. Paleobatimetría definida para la sección estratigráfica del sector Los Naranjos. Compilación de datos de Hedgpeth, 1957 e Ingle, 1975 (Tomado y modificado de Giffuni 2000).

4.5 Definición de ambiente sedimentario

Partiendo de levantamientos estratigráficos, análisis petrológicos y petrográficos realizados en los sectores Los Naranjos, La Villa y quebrada El Boquerón, se elaboró un nuevo código de facies, las cuales se agruparon en asociaciones de facies, con el fin de establecer los elementos de

arquitectura existentes en el ambiente depositacional propuesto.

Separando las asociaciones de facies dominantes para cada sector en el área de estudio, se tiene que:

1. Para el sector Los Naranjos, los depósitos de lodo de prodelta, se encuentran definidos por la asociación de facies Lh y Li, las cuales corresponden a sedimentación de lutitas y limolitas con coloraciones oscuras con presencia de estructuras como laminación horizontal y ondulitas.

2. En cuanto al sector La Villa, las facies dominantes corresponden a la asociación de facies Arc, Ab, Ahu, Ah, Ap, Aro, la cual define los depósitos de barras de desembocadura del frente deltaico. Además, se observan potentes estratos de lutitas entre las areniscas granocrecientes, los cuales representan la zona distal de frente deltaico con una asociación de facies Ha, Ham, Hl, Lh, Lc, generada a raíz de la decantación y arrastre de sedimentos al fondo marino.

3. Por último, la sección del sector quebrada El Boquerón en su totalidad corresponde a depósitos de llanura deltaica, los cuales presentan asociaciones de facies Arc, Ap, Ah, Aa, Ab, As, Ahu, Aro para canales distributarios y, Ha, Ham, Hl, Lh, Lc para áreas interdistributarios.

A raíz de los análisis elaborados con base en las observaciones y similitudes apreciadas en las secciones estratigráficas del área de estudio, se propone que el modelo de ambiente sedimentario corresponde a un sistema deltaico dominado por ríos, debido a las características sedimentológicas que exponen las secuencias sedimentarias en las columnas estratigráficas levantadas.

Codificación de Facies		
Código de facies	Facies	Estructuras sedimentarias
Aa	Arenisca masiva con geometría acanalada y base erosiva	Granodecrecencia hacia el tope
As	Arenisca de grano grueso masiva	Estratificación cruzada en surcos. Eventuales ripples de corriente al igual que existencia de raíces y plantas.
Ap	Arenisca muy fina a gruesa. A veces masiva	Estratificación cruzada plana. Ocasionalmente con raíces, estructura flaser y concreciones.
Ah	Arenisca muy fina a gruesa	Estratificación o laminación horizontal, posible presencia de estructura flaser.
Ahu	Arenisca muy fina a gruesa	Estructura hummocky
Aro	Arenisca muy fina a gruesa	Ripples de oscilación con presencia de raíces.
Arc	Arenisca muy fina a gruesa	Ripples de corriente. Ocasionalmente presencia de laminaciones de carbón y escasas y estructuras de carga.
Ab	Arenisca muy fina a gruesa	Bioturbaciones. Eventualmente presencia de ondulitas.
Ha	Heterolíticas con dominio arenoso	Eventualmente con laminación horizontal.
Ham	Heterolíticas con dominio arenoso	Presencia de materia orgánica como raíces y plantas. Bioturbaciones.
Hl	Heterolíticas con dominio lutítico	Ondulitas. Ocasionalmente con presencia de raíces y bioturbaciones. Eventualmente concreciones.
Li	Limolitas gris oscuro	Ondulitas o laminación horizontal.
Lic	Limolita gris oscuro a negro	Laminación horizontal y presencia de carbón.
Lh	Lutitas	Laminación horizontal u ondulítica. Ocasionalmente con presencia de materia orgánica y estructura lenticular.

Tabla 2. Asociaciones de facies establecidas para el área de estudio

5 Conclusiones

1. A partir de los análisis bioestratigráficos realizados fue posible la ubicación cronoestratigráfica en los tres sectores del área de estudio de la siguiente manera:

Primeramente en el sector Los Naranjos, fue posible la datación a partir de las especies de foraminíferos encontrados, estableciendo las biozonas de conjunto desde el Campaniense-Maastrichtiense (biozona de la *Oolina*Sp), pasando por el Daniense-Thanetiense (Biozona de la *Globorotaliaehrenbergi*) hasta el Ypresiense-Luteciense con la biozona de la *Globanomalina*pseudochapmani, arrojando una edad Campaniense-Luteciense en este sector con un predominio evidente de las especies bentónicas sobre las planctónicas a causa de la gran extinción masiva existente en el límite Cretácico-Terciario. Por otro lado, en el sector La Villa, fueron realizados análisis palinológicos permitiendo establecer una edad Paleoceno-Eoceno medio a través del descubrimiento de los fósiles *Foveotritetesmargaritae*, *Tetracolporitesbre-vicolpus* y *Psilamonocolpitesmedius*. En cuanto al sector quebrada Boquerón la datación no fué posible por medios paleontológicos ya que la sección resulto ser estéril.

2. Se propone el modelo de ambiente sedimentario para los tres sectores del área de estudio, el cual corresponde a un ambiente deltaico progradante dominado por ríos. Por otra parte, se establece la dirección de progradación del delta de SW a NE a causa de los sub-ambientes dominantes en cada uno de los sectores del área de estudio, además de indicar la extensión de las formaciones diferenciadas, la cual se muestra a continuación:

3. Se propuso la diferenciación de las unidades estratigráficas aflorantes en los tres sectores del área de estudio a partir de la comparación de sus características sedimentológicas, paleontológicas y paleoambientales con las unidades ya establecidas en los Andes Venezolanos, llegando a la conclusión que la sedimentación Cretácica corresponde a la Formación Colón/Mito Juan, el Paleoceno a la Formación Barco y el Eoceno a la Formación Misoa. Seguidamente se muestra en la figura la correspondencia de las unidades estratigráficas pertenecientes al área de estudio con las formaciones ya establecidas en los flacos Norandino y Surandino, concluyendo que la mayoría de las secciones aflorantes pertenecen al flanco Surandino.

Referencias

- Alcoba L, Bondarenko AV, 2005, ología de in-vertebrados. Obtenido de <http://e-lib.gasu.ru/>
- Alegret L, 2008, Evolución paleoambiental durante el transito Cretácico/Paleógeno basada en foraminíferos Bentónicos. *Revista española de paleontología*, 23(1), 15-30.
- Al-Mutwali M, AL-Doori M, 2012, PlanktonicForaminife-

- ral Biostratigraphy of Shiranish Formation in Dohuk Area/Northern Iraq. *Iraqi National Journal of Earth Sciences*, 12(3), 17-40.
- Alonso A, 2010, Rocas detríticas. Componentes y caracterización de los distintos tipos. *Petrología sedimentaria*, 2(3), 57-79.
- Arenillas I, Arz J, 2013, Origin and evolution of the planktic foraminiferal Family Eoglobigerinidae Blow, 1979, during the early Danian (Paleocene). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30(1), 159-177.
- Ayala Omaña R, 2012, Nociones Básicas de Geología (Primera ed.). Venezuela.
- Bermúdez P, 1997, Foraminíferos plantónicos [catálogo en línea]. Recuperado el 13 de febrero de 2016, de http://www.pdvsa.com/lexico/centro/catalogo/afp-heterohelix_globulosa.htm
- Bhattacharya JP, 2010, Deltas. En NP. James, & RW, Dalrymple, Facies Models 4 (págs. 233-364). Kingston: Geological Association of Canada.
- Briceño E, Montilva N, 2014, Cartografía geológica de superficie de la región de Canaguá (HOJA CN-5940-III-NO), Municipio Arzobispo Chacón, Estado Mérida - Venezuela. [Tesis de pregrado]. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Burjachs F, 2006, Palinología y restitución paleoecológica. *ecosistemas*, 15(1), 7-16.
- Burkley J, 1975, Geochronology of the Central Venezuelan Andes. Ph. D. Thesis, Case Western Reserve Univ.
- Castro Dorado A, 2015, Petrografía de rocas ígneas y metamórficas. Madrid, España. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/291091843/Castro-Dorado-Petrografia-de-rocas-igneas-y-metamorficas-pdf-Petrografia-de-Rocas-Igneas-y-Metamorficas>.
- Cerrada Milgreya Mora K, 2007, Caracterización geofísica mediante la aplicación de sísmica de refracción entre los sectores Zumba-La Parroquia y la avenida Andrés Bello, estado Mérida [Tesis de pregrado]. Mérida: Universidad de Los Andes.]
- CNE 2008, Mapa electoral del estado [Imagen]. Obtenido de http://www.cne.gob.ve/divulgacion_regionales_2008/index.php?e=12&m=00&p=00&c=000000000&t=00&ca=02&v=00
- Cushman J, 1928, Foraminifera, their classification and economic use. Sharon, Mass., U.S.A: Harvard University.
- Dabrio Gonzalez C, 1984, Estructuras sedimentarias primarias. En V. Gabaldon, Ciclo de seminarios de sedimentología (págs. 13-26). Madrid: Ministerio de Industria y Energía. Obtenido de http://eprints.ucm.es/10884/1/1984_L-2_Estructuras_sedimentarias_IGME.pdf
- Dabrio Gonzalez C, 1984, Sedimentación en costas siliciclásticas, deltas y mares someros. En V. Gabaldon, Ciclo de seminarios de sedimentología (págs. 151-170). Madrid: División de Geología de I.G.M.E.
- del Ramo, A., & Guillén, F. (s.f.). Los minerales. Titanita [mensaje en un blog]. Obtenido de Región de Murcia Digital: http://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,365,m,108&r=ReP-26543-DETALLE_REPORTAJESABUELO
- Dott R, 1964, Wacke, graywacke and matrix: what approach to immature sandstone classification? *Journal of Sedimentary Petrology* 34, 625-632.
- Erlich R, Macsopay O, Nederbragt A, Lorente M, 1999, Paleogeography and depositional environments of Upper Cretaceous rocks of western Venezuela. En R. Erlich, Depositional environment, geochemistry, and paleoceanography of upper Cretaceous organic carbon-rich strata, Costa Rica and western Venezuela (págs. 41-90). Amsterdam.
- Figueroa Gaspariano, N, 2013, Relación entre las propiedades petrofísicas de la roca almacenadora en depósitos turbidíticos y la producción de hidrocarburos y análisis del sector central del campo Tajin de la cuenca Chicontepec, (Tesis de pregrado). Uni-versidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Folk R, 1951, Stages of textural maturity in sedimentary rocks. *J. Sediment. Petrol.* 21: 127-130.
- Folk R, 1968, Petrology of Sedimentary Rocks. Austin. 159 p.
- Folk R, (s.f.). A comparison chart for visual percentage estimation: *Journal of Sedimentary Research*, 21, 32-33.
- Fuenmayor A, 1989, Manual de Foraminíferos de la Cuenca de Maracaibo. Maracaibo: maraven.
- Galloway JJ, Morrey M, 1929, A Lower Tertiary Foraminiferal Fauna From Manta, Ecuador. *Bulletins of American Paleontology*, V.15, N.55, Pl.5, F.1.
- Galloway JJ, Morrey M, 1931, Late Cretaceous foraminifera from Tabasco, México. *Journal of Paleontology*, 5(4), 329-354.
- García Casco A, Velilla Sánchez N, 2011, Petrología Descripciones petrográficas. Recuperado el 15 de marzo de 2016, de Máster para Profesorado de Secundaria: <http://www.ugr.es/~agcasco/msecgeol/>
- Georgescu MD, 2009, Taxonomic revision and evolutionary classification of the biserial Cretaceous planktic foraminiferal genus *Laeviheterohelix* Nederbragt, 1991. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 6(2), 315-334.
- Giffuni G, 2000, Bioestratigrafía secuencial. Principios de aplicación práctica de los estudios bioestratigráficos al análisis de estratigrafía secuencial con un ejemplo de Venezuela [Diapositivas PowerPoint]. Recuperado el 10 de mayo de 2016, de <https://es.scribd.com/doc/85098898/Bioestratigrafia-Secuencial#download>
- Gonzalez de Juana C, Iturralde de Arozena J, Picard Cadillat X, 1980, Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Caracas, Venezuela: EDICIONES FONINVES.
- Google Earth (version 7.1.5.1557) [software]. (2016). Google. Recuperado el 20 de noviembre de 2015, de <http://earth.google.com>
- Guerrero E, 2015, Análisis palinológico para establecer la diferenciación estratigráfica de la secuencia Terciaria de Canagua, estado Mérida [Nota Técnica]. Venezuela.

- Hesseman, M. (2016). Foraminifera.eu Project Database. Recuperado el 12 de febrero de 2016, de <http://www.foraminifera.eu>
- Hunter V, 1972, A middle Eocene flysch from east Fal-cón, Venezuela. VI Conf. Geol. del Caribe. Porlamar, Nueva Esparta, (p. 126-130).
- Iccarino S, Premoli I, 1979, Paleogene planktonic foraminiferal biostratigraphy of DSDP Hole 398D, Leg 47B, Vigo Seamount, Spain. in Ryan, W.B.F., Sibuet, J.-C., et al., *Init.Repts. DSDP, 47 Part 2 of the cruises of the drilling vessel Glomar Challenger, Vigo, Spain to Brest, France.*
- Ignacio L, Arz J, Molina E, 2000, El uso didáctico de los foraminíferos en la enseñanza de ciencias de la tierra: su distribución paleocenográfica en el tránsito Cretácico-Terciario. Enseñanzas de las ciencias de la tierra, 108-118.
- Izquierdo MG, Paredes SA, 2001, Petrología sedimentaria de núcleos de rocas de pozos petroleros. Instituto de investigaciones eléctricas, p. 166.
- Jabbour G, Márquez Guerra I, 2009, Un modelo para la clasificación de areniscas. *Rev. Ciencia e Ingeniería*, 30(3), 219-228.
- Jiménez Moreno G, 2010, Micropaleontología [diapositivas de Power Point]. Obtenido de http://www.ugrestratig.es/contenidos/Documentos/actualiz_anuales/docencia_descargas/01_Introduccion.ppt
- Kaminski MA, Gradstein FM, (s.f.). Atlas of Paleogene cosmopolitan deep water agglutinated foraminifera. Obtenido de <http://www.nhm2.uio.no/norges/atlas/>
- Keller G, 2002, Guembeltria-dominated late Maastrichtian planktonic foraminiferal assemblages mimic early Danian in central Egypt. *Marine Micropaleontology*, 47, 71-99.
- Kuhnt W, Moullade M, Kaminski M, (s.f.), Upper Cretaceous, K/T Boundary, and Paleocene agglutinated foraminifera from hole 959D (Cote D'ivoire-Ghana transform margin). (J. Mascle, G. P. Lohmann, & M. Moullade, Edits.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 159.
- La Marca E, 1997, Origen y evolución geológica de la Cordillera de Mérida: (Andes de Venezuela). Mérida, Venezuela: Unidad de Producción de la Facultad de Ciencias Forestales.
- Léxico Estratigráfico de Venezuela. (1997). Caracas, Venezuela.
- Loeblich A, Tappan H, 1964, Protista 2. En R. Moore, *Treatise on invertebrate paleontology* (págs. 2-900). New York: The geological Society of America.
- Mallory VS, 1970, Lower tertiary foraminifera from the Media Agua creek Drainage area, kern County, Cali. *Volume 2*.
- Meléndez B, 1998, *Tratado de Paleontología. Tomo I.* Madrid, España. Obtenido de <http://wzar.unizar.es/perso/emolina/pdf/Molina1998MicroInMelendez.pdf>
- Méndez Baamonde J, 2006, *Petrología.* Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- Méndez N, (s.f.). Un Geólogo en Apuros [Mensaje en un blog]. Obtenido de <http://www.ungeologoenapuros.es/2014/05/la-importancia-de-usar-escala-en-las-fotografias/>
- Montijo, A. (2012). Petrología de rocas Detríticas [Mensaje en un blog]. Obtenido de <http://gaia.geologia.uson.mx/academicos/amontijo/detríticas/temario.htm>
- Montijo A, (s.f.). Clasificación de areniscas [Mensaje en un blog]. Obtenido de <http://gaia.geologia.uson.mx/academicos/amontijos/clasare.htm>
- Müller J, de Di Giacomo E, Van Erve A, 1985, A Palynological zonation for the Cretaceous, tertiary and Quaternary of northern South America. VI Cong. Geol. Venez. Caracas, Venezuela: S.V.G. 2: 1041-1080.
- National Museum of Natural History. (2014). Obtenido de Smithsonian Institution: http://collections.si.edu/search/results.htm?q=record_ID%3Anmnhpaleobiology_3155406&repo=DPLA
- Olsson RK, Berggren WA, Hemleben C, Huber BT, 1999, Atlas of Paleocene planktonic foraminifera - online version, *Smithsonian Contributions to Paleobiology* Vol. 85 p. 1-252.
- Parnaud F, Gou Y, Pascual J, Capello MA, Truskowski I, Passalacqua H, 1995, Stratigraphic Synthesis of Western Venezuela. En A. J. Tankard, R. Suarez, & H. J. Welsink, *Petroleum basins of South America* (págs. 681-698).
- Perez-Rodríguez I, Lees JA, Larrasoña JC, Arz JA, Arenillas I, 2012, Planktonic foraminiferal and calcareous nanofossil biostratigraphy and magnetostratigraphy of the uppermost Campanian and Maastrichtian at Zumaia, northern Spain. *Cretaceous Research*, 100-126.
- Ramírez R, Campos V, 1969, Geología de la región de la Grita-San Cristóbal, estado Táchira. IV Cong. Geol. Venez. Caracas.
- Richter AE, 1989, *Manual del coleccionista de fósiles.* Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- Rodríguez J, Arche A, 2010, Deltas. En A. Arche, *Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (págs. 561-618). Madrid: Consejo superior de investigaciones científicas.
- Rogl F, Egger H, 2012, A revision of lower Paleogene planktonic foraminifera described by K.H.A. Gohrbandt from the Northwestern Tethyan realm (Helvetic nappe system, Salzburg, Austria). *Austrian Journal of Earth Science*, 105(1), 39-49.
- Rull V, 1997, Sequence analysis of Western Venezuelan Cretaceous to Eocene sediments using Palynology: Chrono-paleoenvironmental and paleovegetational approaches. *Palynology*, 21(1), pp. 79-90. doi:10.1080/01916122.1997.9989488
- Rull V, Montoya E, 2012, El origen de la Gran Sabana: Pistas del pasado. En M. Sánchez-Villagra (Ed.), *Venezuela Paleontológica* (págs. 335-345). Zürich: Universität Zürich.
- Sandoval B, 2006, *Evolución sedimentológica-estratigráfica-tectónica de la cuenca de Maracaibo* [Diaposi-

- tiva en línea]. Obtenido de <https://es.scribd.com/presentation/86021670/Cuenca-de-Maracaibo-1>
- Saxena R, Tripathi SK, Prasad V, 1997, Palynofloral investigation of the Tura Formation (Paleocene) in NongwalBibra area. *Geophytology*, 26(1), 19-31.
- Serra O, 1987, Análisis de ambientes sedimentarios mediante perfiles de pozo. Caracas, Venezuela: Schlumberger.
- Serra, X. (2009). Geología del uranio en Kazajistán: aspectos geopolíticos (ARI) [Mensaje en un blog]. Recuperado el 01 de mayo de 2016, de http://www.realinstitutoelcano.org/wps/portal/riecano/Imprimir?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/elcano/Elcano_es/Zonas_es/ARI69-2009
- Shagam R, 1972, Geología de los Andes Centrales de Venezuela: IV Congreso Geológico Venezolano. Tomo II (pp. 935-936). Caracas, Venezuela: Ministerio de fomento.
- Spalletti L, 2006, Sedimentitas Ferruginosas [diapositivas de Power Point]. Recuperado el 28 de marzo de 2016, de <http://www.fcnyu.unlp.edu.ar/catedras/sedimentologia/pdf/ferruginosas.pdf>
- Speijer RP, 1994, Extinction and recovery patterns in benthic foraminiferal paleocommunities across the Cretaceous/Paleogene and Paleocene/Eocene boundaries [Tesis de doctorado]. Netherlands: Geológica Ultraiectina.
- Tazzo MD, 2008, Elementos petrogenéticos de la granodiorita de El Carmen, sector Capilla del Carmen y Cacute, noreste de la Ciudad de Mérida [Tesis de pregrado]. Mérida: Universidad de Los Andes.
- Toro R, Cerrada R, Sánchez E, Cepeda M, Mousalli V, Guerrero O, 2011, Sedimentología y geomorfología andina [Mensaje en un blog]. Obtenido de <http://sedimentologiandina.blogspot.com/2011/03/palinologia-del-paleogeno-en-los-andes.html>
- Vázquez Castro G, 2011, Correlación estratigráfica [Archivo PDF]. Obtenido de <http://usuarios.geofisica.unam.mx/gvazquez/yacimientosELIA/zonadesplegar/Clases/Clase%2020%20Correlacion%20estratigrafica.pdf>
- Vera Torres J, 1994, Estratigrafía Principios y Métodos. Madrid, Venezuela: Editorial Rueda, S. L.
- Vivas L, 1992, Los Andes Venezolanos. Academia nacional de la Historia. Caracas, Venezuela, pp. 3-106.
- White M, 1928, Some Index Foraminifera of the Tampico Embayment Area of Mexico. Part I in *Journal of Paleontology*. V.2, N.3 Pl.29 F.10. New York.
- Zamora LG, 1977, Uso de perfiles en la identificación de ambientes sedimentarios del Eoceno del Lago de Maracaibo. En S. V. Geólogos (Ed.), V Congreso Geológico Venezolano; Memoria. Tomo IV, pp 1359-1376, Caracas: Ministerio de Energía y Minas.
- Alarcón, Viviam:** Ingeniero Geólogo de la Universidad de Los Andes, Venezuela.
- Castillo, María José:** Ingeniero Geólogo de la Universidad de Los Andes, Venezuela. Correo electrónico: maria_jose26@hotmail.com
- Rivero, María;** Ingeniero Geólogo. Profesora Asistente de Estratigrafía de la Universidad de los Andes. Correo electrónico: veronicagil795@hotmail.com.
- Guerrero, Omar:** Geólogo. Profesor Titular de Sedimentología de la Universidad de los Andes. Correo electrónico: oguerre@ula.ve.
- Guerrero, Ersy:** Ingeniero Geólogo. Laboratorio de Palinología- PDVSA – Maracaibo.

Capítulo 88

Indicadores de gestión en sistemas de abastecimiento humano

Espinosa, Carlos^{1*}; Pérez, Mária²; Focà, Vecellio³

¹ y ²Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, Universidad de Los Andes,

³Departamento de Hidráulica y Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes,
Mérida, Venezuela.

*caesji@hotmail.com

Resumen

El abastecimiento de agua para consumo humano es un acto de salud pública y de allí su importancia. En su fase operativa el desempeño de los sistemas de abastecimiento de agua potable depende de factores como la calidad y la disponibilidad del agua en las fuentes, el consumo del agua por parte de los usuarios, las pérdidas físicas del sistema y el catastro de los usuarios. El cambio climático y la intervención de las cuencas han generado estiajes más prolongados y severos, y deterioro en la calidad de las aguas naturales. Las bajas tarifas del agua, la carencia de una cultura de mantenimiento y deficiencias en los sistemas de comercialización de las empresas operadoras han incidido a su vez en el consumo de agua y en general en los Índices de Gestión. El presente trabajo desglosa y analiza los factores involucrados en los Indicadores de Gestión “Agua No Facturada” (ANF) y el “Índice de Pérdidas por Infraestructura” (IPI ó ILI), y sugiere algunas conclusiones y recomendaciones a esta problemática.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

El abastecimiento de agua para consumo humano está basado en las siguientes premisas:

El Abastecimiento de Agua para Consumo Humano es un acto de Salud Pública, de allí su importancia.

El Abastecimiento de Agua para Consumo Humano debe ser de «calidad adecuada» (agua potable) y en «cantidad suficiente» (dotación suficiente).

El Abastecimiento de Agua para Consumo Humano debe ser permanente «con alta confiabilidad». Debe ser un «sistema robusto».

Su marco legal lo encontramos en los siguientes Documentos de la República de Venezuela:

Artículos 127, 128 y 129 de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela.

“Es una obligación fundamental del Estado, con la activa participación de la sociedad, garantizar que la población se desenvuelva en un ambiente libre de contaminación, en donde el aire, el agua, los suelos, las costas, el clima, la capa de ozono, las especies vivas, sean especialmente protegidos, de conformidad con la Ley”.

Ley Orgánica para la prestación de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento.

Artículo 1°. “La presente Ley tiene como objeto regular la prestación de los servicios públicos de agua potable y de saneamiento, establecer el régimen de fiscalización, control y evaluación de tales servicios y promover su desarrollo, en beneficio general de los ciudadanos, de la salud pública,…”

“NORMAS SANITARIAS DE CALIDAD DEL AGUA POTABLE” Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 de fecha 13-02-98.

Contiene las concentraciones máximas permisibles para los diferentes parámetros de calidad de agua «organolépticos, físicos, químicos y biológicos», que definen el agua potable “agua apta para consumo humano”.

El Cuadro 1 presenta a criterio del Banco Mundial, las inversiones requeridas en el sector Agua Potable y Saneamiento (APS), para los años 2010-2030, en América Latina. Conforme a estas estimaciones se requieren 249,2 millardos de dólares americanos a un promedio de 12,45 millardos de dólares americanos por año, durante las dos décadas (2010-2030). Esta información confirma la importancia y lo estratégico del sector APS.

Cuadro 1. Inversiones Requeridas en América Latina para el sector APS entre 2010-2030. Banco Mundial.

Servicio	US\$ Millardos [2010-2030]	US\$ Millardos Promedio/año	Meta para 2030
Agua Potable ¹	45.4	2.27	100% cobertura
Alcantarillado ²	79.4	3.97	94% cobertura
Depuración ³	33.2	1.66	64% depuración
Drenaje ⁴	33.6	1.68	85% área urbana
Fuentes de Agua ⁵	27.1	1.35	100% demanda incremental
Formalización de conexiones de APyS	30.5	1.52	50% reducción de la brecha
Total	249.2	12.45	

2 Marco Teórico

2.1 Indicadores de gestión

Los Indicadores de Gestión más conocidos y utilizados son el Índice de Agua No Facturada (IANF) y el Índice de Pérdidas por Infraestructura (IPI ó ILI).

Índice de Agua No Facturada “IANF”.

$$IANF = \frac{\text{Produccion} - \text{Facturacion}}{\text{Produccion}} \times 100$$

Donde:

IANF (%)

Producción: Volumen de agua potable que ingresa al Sistema de Distribución (m³/mes), (m³/año).

Facturación: facturación comercial de la Empresa (m³/mes), (m³/año).

Índice de Pérdidas por Infraestructura “IPI” ó “ILI” (AWWA).

$$ILI = \frac{CARL}{UARL}$$

Donde:

CARL: representan las pérdidas físicas anuales reales del sistema, conforme a una auditoría de agua.

UARL: representa el límite teórico inferior de pérdidas físicas que se puede lograr si se aplican en el sistema las mejores tecnologías disponibles para su manejo.

El ILI ó IPI es válido para sistemas con más de 3.000 suscriptores. En la práctica $ILI \geq 1,00$ preferiblemente cercano a 1,00. El ILI requiere de mayor nivel de información del sistema de distribución “buen catastro de red”.

2.2 Índice de agua no facturada “IANF”

De acuerdo con Medina (2011), en el año 2000, la “International Water Association” (IWA), recomendó utilizar el término “Agua No Facturada” refiriéndose a la diferencia entre el agua producida, y aquella que llega al usuario o consumidor y es cobrada. El Agua No Facturada está compuesta por los siguientes aspectos (www.iwahq.org):

- Consumo Autorizado No Facturado
- Pérdidas Aparentes
- Pérdidas Reales

Con la finalidad de facilitar la comprensión de este concepto, el Cuadro 2 presenta el balance de agua y su desglose a nivel del sistema de distribución en un acueducto.

Cuadro 2. Balance de Agua y su desglose a nivel del Sistema de Distribución.

Volumen de Entrada al Sistema de Distribución (m3/año)	Consumo Autorizado	Consumo Autorizado	Consumo Facturado medido	Agua Facturada
		Consumo Autorizado no Facturado	Consumo Facturado no medido	
Pérdidas de Agua		Consumo Autorizado no Facturado	Consumo Facturado medido	Agua No Facturada
			Consumo Facturado no medido	
		Pérdidas Comerciales	Consumo no autorizado	
			Errores de medición	
		Pérdidas Técnicas	Fugas en tuberías	
			Fugas y reboso en almacenamientos	
		Fugas en acometidas		

Fuente: adaptado de Farley y col., 2008

Es este el indicador de gestión más usado. El Cuadro 3 presenta el promedio del IANF en grandes ciudades de África, América Latina y El Caribe y el Norte de América. Se puede observar que en América Latina y El Caribe el promedio del IANF en sus grandes ciudades es del 42%. Valores similares se registran en Asia y África, con 42% y 39% de IANF respectivamente. En América del Norte el IANF promedio es del orden del 15% en sus grandes ciudades.

Cuadro 3. Promedio del IANF en grandes ciudades de África, Asia, América Latina y El Caribe y Norte América. Fuente: Informe sobre la evaluación mundial del abastecimiento de agua y el saneamiento en 2000. OMS.

Región	África	Asia	América Latina y El Caribe	Norte América
IANC %	39	42	42	15

El Cuadro 4 presenta información sobre el IANF y el porcentaje de pérdidas físicas en distintos países del mundo. Llama la atención el caso de Singapur con 11% de IANF y apenas 4% de perdidas físicas. En cambio Malasia su vecino próximo reporto el IANF en 43% y las pérdidas físicas en 32%. El caso de Japón es interesante pues del 15,4% de IANF las pérdidas físicas son el 12%, lo cual permite deducir que su sistema de facturación es muy eficiente.

cir que su sistema de facturación es muy eficiente.

Cuadro 4. Índice de Agua no Facturada y Pérdidas Físicas en distintos países. Tomado y adaptado de Trifunovic, N (1994) “Water Transport and Distribution”. IHE. The Netherlands. Lecture Notes EE017/94/1.

País	Malasia	Singapur	Hong Kong	Taiwán	Japón	Suecia	España	Italia
IANF (%)	43	11	22	23	15,4	21	25	30
Pérdidas Físicas (%)	32	4	10	17	12	10	11	18

El Cuadro 5 presenta la última información publicada por HIDROVEN sobre IANF y se corresponde con los años 2004, 2005 y el primer trimestre 2006, para las distintas regiones de Venezuela. Se puede observar que a nivel nacional el promedio del IANF en ese periodo fue del 62% y a nivel de la Región de Los Andes el promedio del IANF era del 61%. Lo anterior es preocupante.

Cuadro 5. IANF reportados para las distintas Empresas Hidrológicas Venezolanas, años 2004,2005 y 2006. Fuente HIDROVEN. IANF (%).

Años	Hidro Andes	Hidro Llanos	Hidro Páez	Hidro Falcón	Hidro Lago	Hidro Caribe	Hidro Capital	Hidro Seroeste	Hidro Centro
2004	61,62	77,69	54,46	44,38	62,65	72,83	63,46	56,13	71,90
2005	62,04	77,58	53,24	45,79	61,89	72,23	61,87	53,87	71,10
1° trimestre 2006	59,83	75,36	53,68	43,62	60,37	70,91	61,68	55,99	66,45

De la información presentada y analizada anteriormente se pueden plantear las siguientes conclusiones:

a. “En América Latina, un 42% del agua se pierde antes de llegar al cliente. Esta pérdida, que no se le puede facturar a nadie, no sólo complica el reto de aumentar el acceso a agua potable, sino que también representa un gran despilfarro de energía”. Oliveira, 2013. Experto en agua no contabilizada. Boletín 03 2013 del Banco Mundial.

b. En Venezuela los últimos datos reportados por HIDROVEN sobre IANF indican que el 62% del agua se pierde antes de llegar al cliente y no se le puede facturar a nadie.

c. “La reducción de pérdidas de agua es la forma más eficaz para que las empresas de agua y saneamiento generen mayores ingresos y aumenten el suministro de agua potable”. Oliveira, 2013. Experto en agua no contabilizada. Boletín 03 2013 del Banco Mundial.

De igual manera cabe preguntar si estos Sistemas de Abastecimiento, y los de Venezuela en particular, son sustentables con semejantes indicadores de gestión.

2.2.1 Factores que inciden en el IANF

El IANF es afectado o influenciado por los siguientes factores:

- a. Errores en la macro y en la micromedición.

La calibración de estos aforadores debe garantizarse mediante un programa de verificación permanente. Una precisión adecuada es indispensable. Por otra parte, la ubicación de los macromedidores debe garantizar al aforador un lugar seguro, de fácil acceso, condiciones ambientales no severas, condiciones hidráulicas «ideales» y muchas veces suministro eléctrico cercano y confiable. Es importante destacar que en Venezuela no toda la facturación se mide a través de «contadores de Agua». Se implementa además la «facturación estimada».

- b. Deficiencias en el Catastro de Suscriptores.

No todos los usuarios del sistema de abastecimiento están registrados en el Catastro de Suscriptores. La verificación y actualización del Catastro de Suscriptores debe ser una actividad permanente de la Empresa Prestadora del Servicio. Cada metro cúbico de agua incorporado a la facturación por actualización del Catastro de Suscriptores, representa al mes siguiente para la Empresa un incremento de ingreso directo proporcional a la tarifa vigente. De allí su importancia.

- c. Las pérdidas físicas o técnicas del sistema.

Cada metro cúbico de agua recuperado mediante un programa de detección y control de pérdidas físicas representa un volumen de agua disponible para satisfacer a otro suscriptor que lo requiera “genera mayor disponibilidad de agua en el Sistema”. Generar mayor disponibilidad de agua en el Sistema implica un Sistema más apto para enfrentar las épocas de estiaje severo. Adicionalmente representa un ingreso marginal adicional para la Empresa Prestadora del Servicio.

2.2.2 El problema económico que implica el Agua No Facturada (IANF)

El suministro de agua potable implica importantes costos e inversiones para la Empresa Prestadora del Servicio, ya que requiere captar el agua, potabilizarla y distribuirla a los usuarios. Estas acciones implican:

- a. Inversión en infraestructura.
- b. Costos de personal.
- c. Costos operacionales: productos químicos, energía eléctrica, mantenimiento.
- d. Costos administrativos y de gestión de los sistemas.

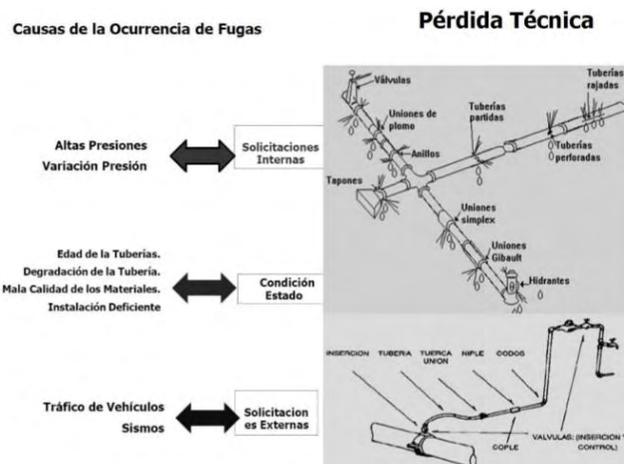


Figura 1. Causas que generan las pérdidas físicas o técnicas en el sistema de distribución de un acueducto. Tomado y adaptado de Medina (2011).

El IANF tiene mucha importancia económica para la Empresa Prestadora del Servicio ya que no le permite generar los recursos económicos necesarios, por las siguientes razones:

- a. El agua se pierde antes de llegar al usuario.
- b. El agua es consumida pero no es medida.
- c. El agua es medida pero no es cobrada.
- d. El agua al llegar al usuario es medida con poca precisión.

2.3 Índice de pérdidas por infraestructura (ILI)

Según Medina (2011), algunos autores afirman, refiriéndose a la estimación de pérdidas de agua en redes de distribución, que no deben ser calculadas como un porcentaje del Agua No Facturada en volumen, sino a nivel estrictamente preliminar dado que el mayorar las pérdidas no toma en cuenta aspectos importantes como los distintos componentes del Agua No Facturada, o costos de operación del sistema.

Señala Liemberger et al (2007), que entre otros factores el Agua No Facturada se encuentra influenciada por:

- Para el cálculo se utiliza indistintamente, como denominador, el volumen introducido al sistema (que incluye el agua exportada) o el agua suministrada (no incluye el agua exportada).
- Diferencias en los niveles de consumo y cambios en el consumo.
- Se aplica sin restricciones particulares si los usuarios poseen tanques de almacenamientos, o se abastecen de manera directa. (En el primer caso, la subestimación del registro de los medidores es mayor).

- El tiempo promedio de suministro en sistemas de suministro intermitentes. (Desafortunadamente, es la regla general en la mayoría de los sistemas de los países poco desarrollados).
- La presión promedio.

Dado esto, el ILI es de difícil implementación como indicador global o para comparaciones operativas de nivel de desempeño, sobre todo si se desean establecer patrones de comparación entre países industrializados y aquellos en vías de desarrollo.

Como referencia, el Cuadro 6 muestra valores típicos del indicador mencionado.

Cuadro 6. Índice Lineal de Pérdidas en redes de distribución.

Índice de Pérdidas (%)	Índice Lineal de Pérdidas		Evaluación cualitativa	Observación
	m ³ /Km/h	m ³ /Km/d		
< 3	< 0,06	< 1,44	muy pocas	inevitables
3 a 10	0,06 a 0,25	1,44 a 6,00	pocas	redes nuevas, muy buen mantenimiento
10 a 15	0,25 a 0,40	6,00 a 9,60	medias	se puede alcanzar con medios técnicos adecuados
15 a 30	0,40 a 1,00	9,60 a 24,00	elevadas	bajo nivel de mantenimiento
30 a 50	1,00 a 2,00	24 a 48	muy elevadas	mantenimiento muy limitado
> 50	> 2.00	>48	demasiado altas	inaceptables

Fuente: adaptado de Medina, 2011

Liemberger propone con la finalidad de obtener un Indicador Operacional de Rendimiento para pérdidas reales, ajustar la unidad del índice de acuerdo a la densidad de conexiones en la red por kilómetro de tubería, según lo indicado en la Figura 2.

Dado que, en términos generales la densidad de conexiones por kilómetro en las redes es superior a 20, la unidad "litro/conexión/día" en redes presurizadas, como indicador, es mucho más eficiente que cualquier indicador porcentual tradicional.

En términos generales este indicador, está afectado por los siguientes aspectos, lo cual limita su aplicación, según señalan Farley y col. en el año 2008:

- La asignación para la densidad de conexiones es "cualquiera", en vez tomar en cuenta la densidad real de conexiones.

- La distancia entre el límite de la propiedad hasta el medidor (o primer punto de consumo) no se toma en cuenta.
- La presión media no se toma en consideración. (En promedio, las tasas de pérdidas en grandes sistemas varían linealmente con la presión)

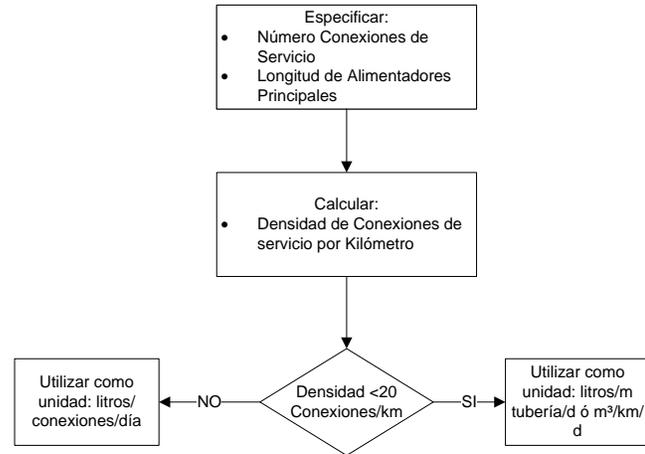


Figura 2. Diagrama de flujo para selección del Indicador Operacional de Rendimiento (Medina 2011).

Si se desean establecer comparaciones a nivel regional, nacional o internacional, estas tres limitantes deben ser tomadas en cuenta, y es por ello que se propone, entonces, la utilización del Índice de Pérdidas por Infraestructura, (ILI por sus siglas en Inglés) para ser implementado, en los casos que corresponda, junto con el Indicador Operacional.

El Índice de Pérdidas por Infraestructura es la relación adimensional (Liemberger y col., 2007) entre las Pérdidas Reales del Año Actual y las Pérdidas Reales Anuales Inevitables.

Este índice, a contraposición de los históricamente utilizados, permite, de acuerdo a la presión media de la red, estimar su valor, tomando en cuenta, que precisamente, una fuga, no es otra cosa que una descarga por orificio, que depende, entonces de la carga hidráulica que exista sobre éste. Por otra parte, dada su amplitud, es universalmente aplicable y comparable incluso entre países desarrollados y en vías de desarrollo, dado que en su concepción, incluye esta discriminación, la cual puede observarse en el Cuadro 7.

La clasificación en Categorías, responde a los siguientes criterios:

- Categoría A: Bueno. Mayor reducción de pérdidas podría resultar antieconómica y es necesario un meticuloso análisis para identificar mejoras en la relación costo – beneficio.
- Categoría B: Potencial para mejoras identificadas. Considerar manejo de presiones, mejor control de fugas y mejor mantenimiento.

- Categoría C: Pobre. Sólo tolerable si el agua es barata y abundante, sólo entonces, deben intensificarse los esfuerzos para la reducción del Agua No Facturada.
- Categoría D: Malo. La empresa está utilizando de manera ineficiente los recursos y los programas para reducción de Agua No Facturada son imperativos.

Cuadro 7. Índice de Pérdidas en redes de distribución.

CATEGORÍA DE RENDIMIENTO TÉCNICO		ILI	PÉRDIDAS FÍSICAS (l/conexión/día) CUANDO EL SISTEMA ESTÁ PRESURIZADO, EN PROMEDIO, EN:				
			10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
PAÍSES DESARROLLADOS	A	1 – 2		< 50	< 75	< 100	< 125
	B	2 – 4		50 - 100	75 - 150	100 - 200	125 - 250
	C	4 – 8		100 - 200	150 - 300	200 - 400	250 - 500
	D	> 8		> 200	> 300	> 400	> 500
PAÍSES EN VÍA DE DESARROLLO	A	1 – 4	< 50	< 100	< 150	< 200	< 250
	B	4 – 8	50 - 100	100 - 200	150 - 300	200 - 400	250 - 500
	C	8 - 16	100 - 200	200 - 400	300 - 600	400 - 800	500 - 1000
	D	> 16	> 200	> 400	> 600	> 800	> 1000

Fuente: adaptado de Farley y col., 2008

3 Conclusiones y recomendaciones

Después de realizar esta investigación documental, se proponen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- El IANF promedio a nivel de América Latina ronda el 42%.
- Los últimos reportes de HIDROVEN (2004, 2005, 2006) de ANF indicaron que el IANF en promedio a nivel nacional era del 62% y a nivel de la región andina 61%.
- Los niveles de ANF reportados en los Sistemas de Abastecimiento en el país, no garantizan la sustentabilidad de los mismos.
- En el momento de enfrentar la creciente demanda de agua en un Sistema de Abastecimiento, lo primero que debe hacerse es una Auditoría de Agua y determinar el nivel de ANF u otro indicador de gestión.
- En la composición ANF las pérdidas físicas «fugas» representan generalmente el mayor porcentaje. Ade-

más la detección y el control de las pérdidas físicas requieren del conocimiento de métodos y el uso de equipos de cierto nivel tecnológico y sus costos asociados.

- La implementación de programas de detección y control de pérdidas físicas en los Sistemas de Abastecimiento permite ahorrar volúmenes de agua que pueden ser de mucha importancia en épocas de estiaje.

- En el momento de abordar el ANF en un Sistema de Abastecimiento generalmente la mejor opción a implementar en el corto plazo es la actualización del Catastro de Redes y de usuarios con mejoras en la micromedición y macromedición. Estas acciones representan en el plazo inmediato para la Empresa incrementos en sus ingresos por facturación.

- Mantener altos IANF en Sistemas de Abastecimiento implica subsidiar a infractores a expensas de suscriptores honestos.

- En el largo plazo las consecuencias de altos IANF son: Deterioro progresivo de las finanzas de la Empresa Prestadora del Servicio y de toda la infraestructura sanitaria con el consecuente deterioro de la calidad del agua y la confiabilidad del servicio.

- El Índice de Pérdidas por Infraestructura propuesto por la AWWA, es una relación adimensional, entre las pérdidas físicas anuales reales del sistema, producto de una auditoría de agua, y el nivel teórico inferior de pérdidas físicas que se puede lograr si se aplican en el sistema las mejores tecnologías disponibles para su manejo.

- Con respecto al Índice de Pérdidas por Infraestructura (ILI), la estimación de pérdidas en redes, no deben ser calculadas como un porcentaje del Agua No Facturada en volumen, sino a nivel estrictamente preliminar según Liemberger et al.

- Con la finalidad de obtener un Indicador Operacional de Rendimiento para pérdidas reales, autores proponen ajustar la unidad del ILI de acuerdo a la densidad de conexiones en la red por kilómetro de tubería.

- Si se desean establecer comparaciones con el ILI a nivel regional, nacional o internacional, se deben tomar en cuenta las tres limitantes que versan sobre la asignación para la densidad de conexiones, la distancia entre el límite de la propiedad hasta el medidor (o primer punto de consumo) y la presión media. Es por ello que se propone, entonces, la utilización del Índice de Pérdidas por Infraestructura (ILI), para ser utilizado en los casos que corresponda, junto con el Indicador Operacional.

- El ILI para su implementación es un indicador que requiere de mayor nivel tecnológico y de información que el IANF.

Referencias

- AWWA. American Water Works Association. Manual M-36. USA.
- Banco Mundial, 2013, Boletín 03 2013.

Farley M, Wyeth G, Ghazali Z, Istandar A, Singh S, 2008, The Manager's Non-Revenue Water Handbook. A Guide to Understanding Water Losses. USAID, EUA.

<http://www.iwahq.org>, consultada el 16 de octubre de 2016-
Liemberger R, Brothers K, Lambert A, McKenzie R, Rizzo A, Waldron T, 2007, Water Loss Performance Indicators. Extraído de la World Wide Web: http://www.waterloss2007.com/pdf_vortraege/Montag/B2-1.pdf, consultada el 16 de octubre de 2016-

Medina M, 2011, Análisis de Demandas Domésticas. Herramientas para Estimación de Demandas de Agua de Usuarios Urbanos. Tesis Magister Scientiae en Planificación y Desarrollo de Recursos Hidráulicos. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

OMS-OPS, 2000, Informe sobre la evaluación mundial del abastecimiento de agua y el saneamiento. Informe Regional de América Latina y El Caribe. Organización Mundial de la Salud. Organización Panamericana de la Salud. Washington, DC, USA.

República de Colombia, 2013, Nivel de pérdidas aceptable para el cálculo de los costos de prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado. Comisión Reguladora del Agua Potable y Saneamiento Básico. Ministerio de la Vivienda. Bogotá, Colombia.

República del Perú, 2001, Estudio de oferta y demanda de servicios de agua potable y alcantarillado Lima y Callao: analisis de la demanda actual. Ministerio de Economía y Finanzas. Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima. Informe Número 1. Lima, Perú.

Trifunovic N, 1994, Water Transport and Distribution. Lecture Notes. EE017/94/1. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering (IHE), Delft, The Netherlands.

Espinosa, Carlos: Ingeniero Civil, M.Sc. en Obras Hidráulicas, Master of Engineering in Sanitary Engineering, Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Prof. Titular del CIDIAT-ULA.

Pérez, María: Ingeniero Civil, M.Sc. En Planificación y Desarrollo de Recursos Hidráulicos. Prof. Instructor de CIDIAT-ULA. Correo electrónico: alalej22@gmail.com

Focà, Vecellio: Ingeniero. Civil. Prof. Instructor del Departamento de Hidráulica y Sanitaria de la ULA. Correo electrónico: vecellio.foca@gmail.com

Capítulo 89

Evaluación de la respuesta sismo-resistente de edificios con estructura mixta de acero y concreto armado en zonas de elevada amenaza sísmica

Ugel, Ronald David^{1*}; Herrera Reyes, Indira²

¹Universidad Politécnica de Cataluña. Campus Norte UPC, C/ Jordi Girona 1-3, Edificio C1, Barcelona, España.

²Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Decanato de Ingeniería Civil. 03001. Barquisimeto, Venezuela.

*rugel@ucla.edu.ve.

Resumen

En esta investigación se evalúa la respuesta sísmica de edificios porticados con estructuras compuestas por niveles inferiores de concreto armado y niveles superiores de acero. En el estudio del comportamiento sismo-resistente se determinó la capacidad, fragilidad y daño usando el Modelo Paramétrico de Capacidad con sus modelos de fragilidad y daño. Para la capacidad estática se utilizó el AdaptivePushover y para la dinámica, el análisis dinámico incremental (IDA). Algunos modelos mostraron notables diferencias de desempeño en función de la esbeltez y configuración geométrica; en los desplazamientos relativos se evidencia que ciertos niveles experimentan su máximo desplazamiento en el rango elástico de respuesta, mientras que en otros existe una alta concentración de inelasticidad. Las curvas de fragilidad y los índices de daño fueron determinados con dos metodologías a fin de revisar el comportamiento en términos de confiabilidad y se evidencia que, en algunas estructuras, existe gran probabilidad de daño nulo mientras que, en otras, existen altas probabilidades de daño moderado, severo o colapso. La mayoría de los modelos sufren deformaciones laterales y degradaciones de rigidez significativas, incursionando frecuentemente más allá de los límites aceptables desde el punto de vista normativo, mostrando a estos factores como indicadores fundamentales del daño. Todo esto ha sido convalidado bajo un enfoque probabilista. En el diseño de la unión rígida mixta se utilizaron criterios de algunos códigos normativos de Norteamérica para placas base en columnas de acero a fin de garantizar la continuidad estructural; de otro modo, la unión debe ser considerada semi-rígida.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

Japón Todo proyecto o modificación estructural implica una determinación detallada y lo más exacta posible de las demandas sobre la estructura. En consecuencia, la respuesta de la edificación en términos de resistencia, capacidad y comportamiento sísmico debe ser muy bien determinada y evaluada. Si los diseños y/o modificaciones estructurales implican diferentes materiales en la conformación de la estructura, se hace muy importante que la evaluación de la capacidad y respuesta de la edificación pueda realizarse considerando principios de incertidumbre, confiabilidad y comportamiento estructural, (Chiellini y col., 2010). En este contexto, diversas investigaciones han estudiado el diseño y análisis de las estructuras compuestas con acero y concreto armado; algunos investigadores se han enfocado en el comportamiento sísmico de tales estructuras compuestas y continuamente se hacen investigaciones sobre metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones. En el estudio de la vulnerabilidad sísmica, diversos investigadores (Barbat y col., 2010, Pujades y col., 2012) han orientado sus trabajos hacia la evaluación de la vulnerabilidad de los edificios en entornos urbanos ante la ocurrencia de un sismo, puesto que recientes tendencias en la ingeniería sísmica reconocen la necesidad de desarrollar este tipo de estudios en aquellas zonas donde se concentra la mayor parte de la población mundial, las infraestructuras y los servicios a fin de evitar catástrofes sísmicas. En este contexto, varios estudios consideran no solo aspectos físicos de la vulnerabilidad sino también su dimensión socio-económica (Marulanda y col., 2009, Barbat y col., 2011, Carreño y col., 2012). La definición de vulnerabilidad está referida y se aplica a la susceptibilidad que tiene una edificación de sufrir cierto grado de daño y afectación como consecuencia de la acción de un evento sísmico de determinadas características. El grado de daño se define como el nivel de deterioro físico que pueden sufrir los elementos de una edificación, denominándose afectación al nivel de perturbación funcional que puede sufrir la misma. Por otro lado, la evaluación del comportamiento sísmico de edificios existentes es a menudo una tarea más difícil que el diseño sísmico de nuevas edificaciones dado que son necesarios métodos de análisis no lineales sofisticados para obtener resultados confiables para este tipo de evaluación. Kreslin y Fajfar (2010) advierten que su aplicación en configuraciones complejas, como es el caso de estructuras compuestas, no es sencilla por cuanto generalmente estos métodos son evaluados en modelos altamente idealizados. Por todo lo anterior, es claro que hacer modificaciones estructurales post proyecto y/o post construcción en una edificación introduce elementos de incertidumbre mucho más importantes sobre el comportamiento sismo-resistente que lo ya descrito.

Esta investigación se planteó revisar, analizar y extraer conclusiones sobre el comportamiento sísmico de edificios

porticados con niveles inferiores de concreto armado y niveles superiores con estructura de acero, tipología estructural que surge de edificaciones híbridas o modificadas en las que se mezclan estructuras porticadas con elementos adicionales de concreto armado y acero, requiriendo por tanto un análisis de vulnerabilidad con solicitaciones adicionales sobre su configuración estructural original.

2 Metodología

2.1 Acción sísmica.

La norma sismo-resistente venezolana acepta que la estructura sismo-resistente puede ser deformada COVENIS, 1756,2001) hasta el rango inelástico sin pérdida sensible de resistencia y que la confiabilidad final de la edificación para resistir terremotos dependerá no sólo del cumplimiento de las regulaciones de la norma sino de un proceso adecuado de ejecución, inspección y mantenimiento de la propia edificación. Se establece que el terremoto de diseño corresponde al sismo con un 10% de probabilidad de excederse en 50 años (período de recurrencia de 475 años). El área objeto de este estudio corresponde a una amenaza sísmica alta y se le asigna un coeficiente de aceleración horizontal A_0 de 0.30 g.

Selección de acelerogramas. En el estudio inicialmente se han revisado registros de datos de *PEER Ground-Motion Database* (2014) y de la *Fundación venezolana de investigaciones sísmicas (FUNVISIS)*, con acelerogramas de sismos con magnitudes $5.0 \leq M_w \leq 7.0$ registrados en suelos con velocidades $V_{s30} 400 \leq V_{s30} \leq 600$ m/s. Para la selección de los registros se evaluó el nivel de amenaza de la zona en la que están ubicados los epicentros, los tipos de daños estructurales causados por el evento y que sean compatibles con el espectro de diseño venezolano de forma natural o con ajustes apropiados. Se eligieron registros sísmicos reales y se han generado otras señales artificiales con rango de períodos de 0.05 a 4.0 s., agregando contenido frecuencial de manera que los espectros de respuesta sean mucho más compatibles con el espectro objetivo pero sin cambiar significativamente la forma general de la señal. Así, de los 5 registros originales escogidos se han construido 10 acelerogramas compatibles con el espectro de diseño normativo del tipo de suelo predominante en la zona de estudio. Estos sismos originales fueron escogidos considerando criterios como los daños producidos en las edificaciones, por ejemplo el caso de los sismos de Loma Prieta en 1989 y NorthRidge en 1994 en California, los cuales generaron daños masivos en las uniones columna-viga sobre todo en las conexiones soldadas (Song y col., 2009). Otro criterio considerado en la selección de los registros fue la cercanía a la zona de estudio y similitud en cuanto a zona de peligrosidad sísmica, como es el caso del sismo de Tucacas, Venezuela, en 2009 y características geológicas y de magnitud de la señal, como el de Trinidad (Colorado, USA) ocurrido en 1983. La Figura 1 muestra las medias de los espectros utilizados y se comparan con el espectro de diseño del suelo de la zona en estudio.

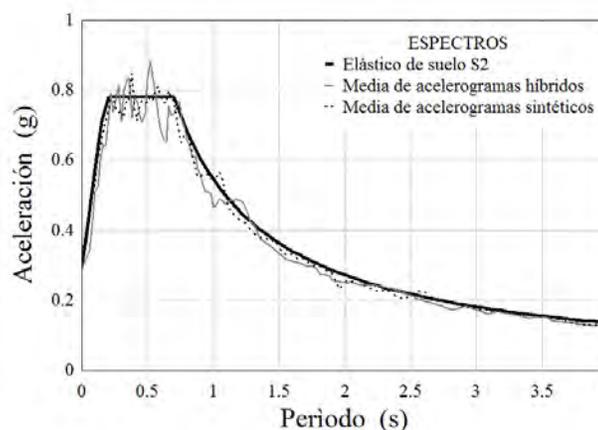


Figura 1. Media de los espectros de respuesta compatibles con espectro de diseño COVENIN

La norma venezolana COVENIN 1756 (2001) establece que las edificaciones porticadas resistentes a momentos que estén emplazadas en una zona con nivel de amenaza sísmica moderada a alta, deben ser diseñadas y verificadas estructuralmente para mantener un nivel de servicio ocupacional ante acciones sísmicas probables para esa zona. Por otro lado, la misma norma establece que, en edificaciones con alturas no mayores de 30 metros o 10 niveles con plantas regulares, el método de análisis es el llamado *Método Estático Equivalente*. Esta metodología se basa en dos criterios fundamentales: la determinación de la fuerza cortante en la base y la distribución de esta fuerza a todo lo alto de la estructura debido a los efectos traslacionales.

2.2 Análisis estático.

Se ha hecho énfasis en los procedimientos estáticos del Empuje Incremental Adaptativo (*Adaptive Pushover*) (Pinho y col., 2008) y el Modelo paramétrico de Capacidad de Pujades y col., (2014). En la evaluación del desempeño se han utilizado los criterios propuestos por el comité *VISION 2000* (SEAOC 1995) y el Proyecto RISK UE (Milutinovic y col., 2003). El estudio inelástico se hizo tomando en cuenta lo señalado en FEMA 750 (2009) y en Mwafy y col., (2002) para la construcción de la curva de capacidad de las 8 edificaciones objeto de estudio. De las curvas de capacidad se han determinado los parámetros *ductilidad* (μ), *reserva de resistencia* (Ω), *factor de reducción de respuesta* (R), así como los valores correspondientes a Fuerzas y Desplazamientos últimos y cedentes, (V_u, V_y, d_u, d_y) con los procedimientos indicados en FEMA 750 (2009). La curva de capacidad se ha generado utilizando el Empuje Incremental Adaptativo (*Adaptive Pushover*), teniendo en cuenta lo señalado por Antoniou y col., (2004) y Papanikolaou y col., (2005) entre otros, que explican que en este tipo de análisis, el patrón de cargas no se mantiene constante sino que es continuamente actualizado en base a una combinación de las formas modales instantáneas correspondientes a los períodos inelásticos de la estructura. De esta forma en las cur-

vas de capacidad son consideradas las contribuciones de los modos altos de vibración así como la resistencia localizada y características modales de los pórticos, inducidas por la acumulación progresiva del daño.

2.3 Análisis dinámico.

En los *Análisis de respuesta en función del tiempo (THA)* se realizaron 320 análisis a 32 pórticos escogidos de las 8 edificaciones, siendo cada pórtilo analizado con los 10 acelerogramas escogidos para este efecto; de cada análisis se obtuvieron 2 gráficos: uno correspondiente al desplazamiento a nivel de cubierta y otro con los desplazamientos relativos entrepisos de cada pórtilo para un total de 640 ($32 \times 10 \times 2$) curvas Time-History. En este estudio se considera lo recomendado por el documento *VISION 2000* explicado en SEAOC (1995) sobre límites máximos en desplazamientos horizontales relativos y los resultados de esta evaluación son comparados con los índices de daño resultantes de la evaluación de la edificación en términos de capacidad, obtenidos de los análisis no lineales estáticos de carácter monotónico.

Para la aplicación del *Análisis dinámico incremental (IDA)* fueron utilizados los mismos 32 pórticos y 10 acelerogramas usados en el *Análisis de respuesta en función del tiempo*. Estos acelerogramas han sido normalizados para este análisis a fin de lograr un mayor control y uniformidad de la acción sísmica en lo referente a los factores de escala. Para cada análisis se utilizaron factores de escala con incrementos de 0.03 con una aceleración normalizada mínima de 0.03 y máxima de 0.33 g, así el análisis dinámico incremental efectuado ha supuesto un total de 3520 ($32 \times 10 \times 11$) análisis dinámicos, correspondientes a los 32 pórticos por 10 acelerogramas por 11 valores de pga para cada análisis IDA. La envolvente de esos puntos es la respuesta dinámica de los pórticos ante la acción sísmica considerada y sus características y magnitudes máximas son comparadas con las curvas de capacidad obtenidas de la aplicación del *Pushover Adaptativo*. La similitud en los resultados y caracterización del daño a través de distintos tipos de análisis, implica un mayor soporte a las conclusiones y comportamiento sismo-resistente de las edificaciones en términos de confiabilidad estructural.

2.4 Estimación de la intensidad del daño.

Se han considerado cuatro umbrales, que a su vez definen 5 posibles estados de daño: *No daño, Leve, Moderado, Severo y Completo*. La probabilidad de alcanzar un estado de daño para distintos niveles de aceleración queda establecida a partir de la generación de las curvas de fragilidad y la matriz que representa la probabilidad de daño estructural en función de una intensidad sísmica. La probabilidad de ocurrencia $P_{(i)}$ de cada estado de daño se define por la Ec. 1:

$$P_{(i)} = P(ED_i/S_d) - P(ED_{i+1}/S_d) \quad (1)$$

donde $P[ED_i/S_d]$ es la probabilidad de que se iguale o

exceda el estado de daño ED cuando la estructura tiene un desplazamiento espectral S_d . De esta forma se hace la evaluación de los edificios ante cada escenario sísmico y para cada estado de daño. La cuantificación de estos resultados se puede hacer también según el parámetro ponderado de daño medio I_{DM} (Moreno 2006).

La estimación de daño aquí se hace utilizando este índice I_{DM} y el modelo de daño desarrollado por Pujades y col., (2014) que determina el índice de daño tomando como referencia fundamental la curva de capacidad de las edificaciones y considerando en su formulación la degradación de rigidez y la energía disipada. Así mismo, los umbrales de daño con valores límites 0.05, 0.2, 0.4 y 0.65 para los estados de daño *leve*, *moderado*, *severo* y *completo*, propuestos por la citada investigación son utilizados para la evaluación del comportamiento de las edificaciones.

3 Casos de estudio

Las configuraciones y características estructurales comunes a todas las edificaciones en estudio responden a estructuras porticadas de diversos edificios típicos en los que los niveles inferiores son de concreto armado (HA) y los superiores son de acero estructural. Para la determinación de la vulnerabilidad se realizó el diseño óptimo normativo considerando el comportamiento elasto-plástico del modelo, se ejecutaron análisis no lineales estáticos y dinámicos para obtener la capacidad y el estado de daño probable. Se evaluaron los edificios en términos de demanda-capacidad. La evaluación del daño esperado se efectuó mediante los modelos de fragilidad y daño de *RISK UE* y de Pujades y col., (2014). El diseño óptimo y las revisiones estructurales elásticas se han realizado con programas de análisis estructural basados en elementos finitos y en los estudios no lineales estáticos y dinámicos se usó el programa *SeismoStruc V7.0*, *SeismoSoft* (2014) que está específicamente desarrollado para aplicaciones de ingeniería sísmica y análisis no lineal. Para todo esto se utiliza la metodología propuesta en *ATC 40* (2005), lo planteado por Vamvatsikos y col., (2002) en el análisis dinámico incremental *IDA* y lo propuesto en el *Modelo Paramétrico de Capacidad* (Pujades y col., (2014).

Edificios de mediana altura. Se estudiaron dos edificios con la misma configuración estructural. El primero de ellos tiene 4 niveles con estructura de concreto armado, siendo ésta una tipología típica de muchas viviendas multifamiliares de la zona en estudio. El segundo edificio tiene las mismas dimensiones y características pero se le ha añadido un quinto nivel con sus elementos estructurales constituidos de perfiles de acero. Las edificaciones tienen una altura de entrepiso de 2.70 m. La longitud del edificio en dirección longitudinal es de 25.01 m y en dirección transversal 13.56 m (Figura 2).

Modelos estructurales de alta y mediana elevación. Se crearon dos modelos básicos de planta regular (Figura 3) para generar tres edificaciones a partir de cada uno de ellos a fin de obtener resultados comparativos directos entre cada

grupo; para ello se aplicaron todos los criterios y consideraciones normativas presentes en las edificaciones existentes. En ambos modelos, las alturas de entrepiso y las distancias entre ejes estructurales son idénticas pero se introdujeron variaciones en las dimensiones de las columnas. Las vigas de concreto armado tienen las mismas dimensiones $0.30 \times 0.50 \text{ m}^2$ y los elementos estructurales de acero son perfiles HEA 160. Las alturas de entrepiso son de 4 m en el primer nivel y 3 m para el resto de entrepisos.

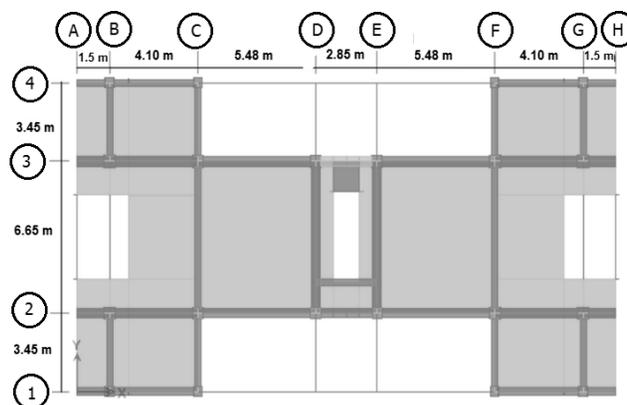


Figura 2. Planta de edificios existentes de mediana altura

De cada modelo básico se generaron tres edificaciones; por un lado, a) el modelo de seis niveles de concreto armado; b) el modelo de 7 niveles de concreto armado y c) el modelo de 7 niveles con los seis primeros de concreto armado y el último de acero, que tiene la misma configuración de concreto en los seis primeros niveles y en el séptimo nivel las vigas y columnas son perfiles de acero. Del segundo grupo con dimensiones de columnas diferentes al primero, surgieron los modelos: d) de seis niveles de concreto armado; e) el modelo de 6 niveles de concreto armado más un nivel añadido de acero y f) un modelo que incorpora dos niveles de elementos de acero sobre la misma configuración de los seis primeros niveles de concreto.

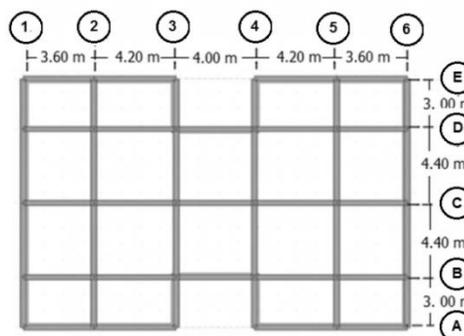


Figura 3. Planta de modelos de mediana y gran altura.

4 Discusión y Resultados

4.1 Capacidad estática y dinámica.

De todos los modelos estudiados aquí son mostrados los resultados de un edificio existente de 5 niveles y un modelo típico de edificaciones de 7 niveles, ambas estructuras con su último piso de acero estructural. Cada modelo se ha analizado a través de sus elementos porticados de 2, 4 y 6 ejes resistentes verticales para el edificio de 5 niveles y 3, 5 y 6 ejes resistentes *verticales* para el segundo modelo de 7 niveles. Se ha realizado un estudio comparativo exhaustivo a fin de valorar la confiabilidad de la respuesta usando tres métodos de análisis no lineal, incluyendo el enfoque probabilista.

Modelo mixto de 5 niveles. El *Pushover Adaptativo* basado en desplazamientos (Pinho y col., 2008) y la envolvente *IDA* generaron valores en rigidez inicial y comportamiento inelástico cuyas diferencias porcentuales no son significativas. Las diferencias medias entre los valores de pendiente elástica y V_u (cortante último) determinados en ambas metodologías tampoco exceden en ningún caso el 5%. Por otro lado, la media de los desplazamientos dinámicos mostró que para una aceleración de diseño de 0.30 g, los valores máximos se asemejan a los desplazamientos últimos (du) obtenidos en el análisis *Pushover Adaptativo*, haciéndose la diferencia más pequeña en la medida que aumenta la rigidez de los sistemas porticados. Los desplazamientos relativos de los sistemas porticados son comparados con edificaciones similares de concreto armado (CA) y los resultados han mostrado diferencias significativas entre los modelos de 4 y 5 niveles, mientras que los modelos de 5 niveles de concreto armado y mixto, presentan menores diferencias entre sí.

Modelo mixto de 7 niveles. En las figuras 4 a 7 se muestran los resultados en términos de capacidad, desplazamientos estáticos, dinámicos y relativos por nivel, tanto en modelos con estructuras mixtas como en modelos equivalentes de concreto armado (CA), en algunos de los sistemas estudiados.

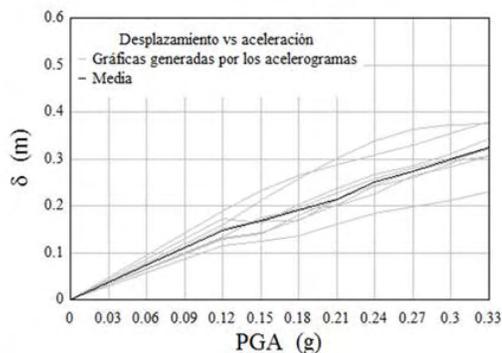


Figura 4. Desplazamiento dinámico del sistema siete niveles - 2 vanos.

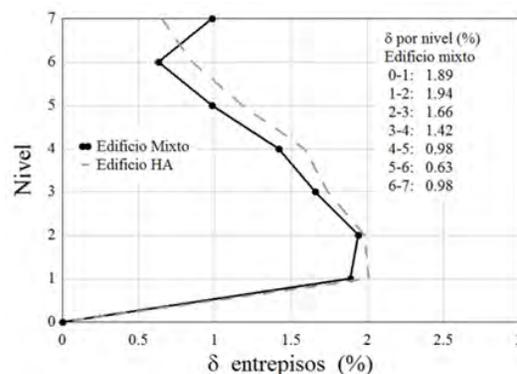


Figura 5. Comparación de desplazamientos del modelo siete niveles - 2 vanos con otro modelo similar de CA:

Las curvas de capacidad muestran que en los sistemas porticados de 7 niveles, el *AdaptivePushover* basado en desplazamientos (Pinho y col., 2008) y la envolvente *IDA* generaron valores en rigidez inicial y comportamiento inelástico sin diferencias porcentuales significativas en todos los sistemas y se observa la influencia de la rigidez estructural y la relación *altura/ancho total (esbeltez)* de los modelos se revela como un indicador clave de la capacidad. Los modelos más esbeltos muestran una rápida caída de capacidad resultando en un comportamiento inelástico con características frágiles, mientras el modelo con menor esbeltez presenta mayores condiciones de ductilidad. La media de los desplazamientos dinámicos muestran que para una aceleración de diseño de 0.30 g, los desplazamientos se encuentran más allá del asociado al valor máximo de capacidad, (figuras 4 y 6). Los desplazamientos relativos por nivel (figuras 5 y 7) son comparados con edificaciones similares de concreto armado y los resultados muestran que en el modelo de 7 niveles el último piso de acero genera desplazamientos relativos muy diferenciados y desacoplados con respecto a los otros niveles. En la Tabla 1 se resumen y muestran tres parámetros de capacidad de los sistemas de siete niveles que resultan de estos análisis estáticos y dinámicos.

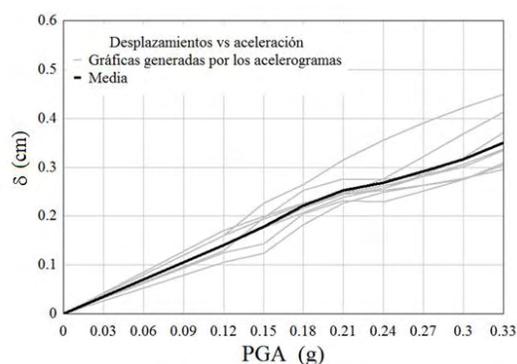


Figura 6. Desplazamiento dinámico del sistema siete niveles - 4 vanos.

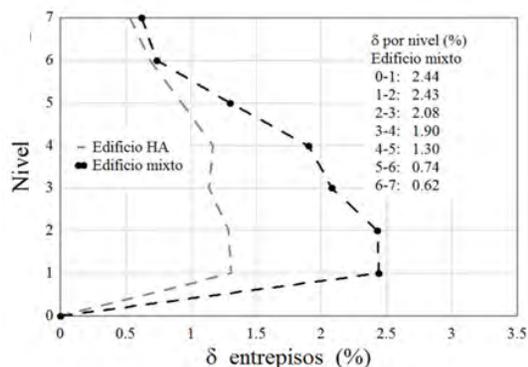


Figura 7. Comparación de desplazamientos del modelo siete niveles - 4 vanos con modelos similares de CA.

Tabla 1. Pendientes iniciales y valores últimos de los modelos de 7 niveles.

	m inicial (kN/m)	d u (m)	V_u Adaptativo (kN)	V_u Dinámico (kN)
2 vanos	65	0	536.40	715.
4 vanos	34	.304	1258.00	88
5 vanos	933	.372	1638.00	.47
7 vanos	492	.464		1368
				.95

Las diferencias entre los desplazamientos últimos du asociados al cortante último V_u y los desplazamientos máximos asociados a la máxima capacidad no permiten extraer conclusiones acerca de la degradación de la rigidez asociada a las cargas cíclicas propias de un movimiento sísmico, la energía disipada asociada a este proceso de degradación más allá del cortante máximo y el consecuente daño probable. Esto es particularmente importante en el caso de sistemas mixtos puesto que, tal como se ha mostrado experimentalmente en Ugel (2015), los niveles superiores de acero pueden continuar soportando cargas sin alcanzar su cortante máximo mientras que algunos de los elementos de concreto ya han entrado en su etapa de degradación post fluencia. Para la determinación de estos últimos parámetros referentes a la degradación de rigidez, la disipación de energía y el daño asociado a ello, se ha utilizado el modelo paramétrico de capacidad y los modelos de fragilidad y de daño basados en la degradación relativa de la rigidez secante y la disipación relativa de energía propuestos por Pujades y col., (2014) para edificios de concreto armado. Esta metodología también ha sido utilizada para ajustar modelos numéricos equivalentes de modelos experimentales de elementos estructurales como juntas y pórticos elementales (Ugel 2015).

4.2 Modelos de capacidad.

La Figura 8 muestra las curvas de capacidad iniciales con sus correspondientes ajustes paramétricos. Las variaciones obtenidas entre los ajustes iniciales y mejorados son

en términos generales muy pequeñas y en algunos casos no significativas. En la Tabla 2 se muestran los 5 parámetros independientes de las curvas de capacidad.

Tabla 2. Parámetros independientes de curvas de capacidad

N_i veles	v anos	m (kN/m)	D u (cm)	V_u (kN)	t	c
5	1	2	2	21	C	1
		626	5.10	2.93	.92	.35
	3	6	2	42	C	1
5	5	2	3	14	C	C
		6991	6.30	18.00	.11	.73
	2	5	3	49	C	C
7		999	1.78	3.00	.69	.97
	4	1	3	12	C	1
		5232	7.94	83.00	.38	.24
7	5	1	4	16	C	C
		7842	7.33	71.00	.17	.75

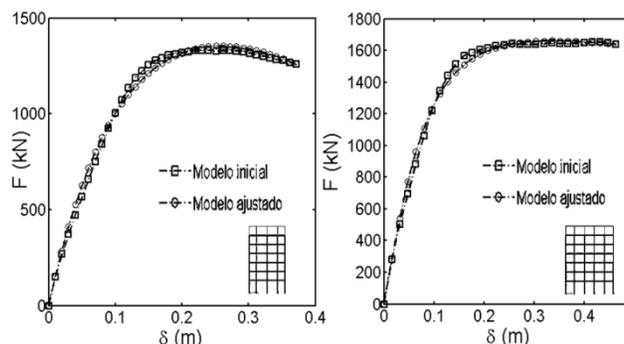


Figura 8. Curvas de capacidad de 2 de los modelos de 7 niveles.

4.3 Modelos de daño.

A partir de los modelos ajustados es posible usar, para la determinación del modelo de daño, el procedimiento descrito en (Pujades y col., 2014). En la Figura 9 se muestran las curvas normalizadas de capacidad no lineal (CNLN), las de degradación de la energía (E_N), de la rigidez tangente (RT_N) y de la rigidez secante (RS_N). Se muestra también el índice de daño normalizado DI_N , explicado en la misma metodología. El parámetro $\alpha = 0.7$ fue utilizado como ajuste entre las contribuciones al daño global estructural de la degradación de la rigidez de deformación y de la disipación de energía con lo que las contribuciones quedan definidas así: 70% RS_N y 30% E_N . Con este índice de daño DI_N son definidos los nuevos umbrales de los estados de daño con los que se han generado las curvas de fragilidad que se comparan con lo planteado en el proyecto Risk-UE (Milutinovic y col., 2003, Lagomarsino y col., 2005).

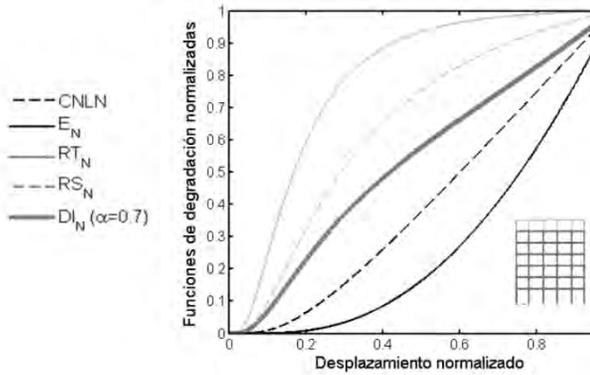


Figura 9. Modelo normalizado de daño en sistema 7 niveles – 5 vanos.

4.4 Curvas de fragilidad.

Utilizando las curvas de fragilidad fue definida la probabilidad de que se iguale o exceda un nivel de daño pre-establecido. Las metodologías del estudio de comportamiento sismo-resistente basadas en curvas y espectros de capacidad como *ATC 40* (2005) proponen estos niveles como 0 (daño nulo), 1 (leve), 2 (moderado), 3 (severo) y 4 (completo). Los umbrales para los 4 estados de daño utilizados en este estudio son los propuestos por Pujades y otra (2014) de 0.05 (daño leve), 0.2 (daño moderado), 0.4 (daño severo) y 0.65 daño completo en el índice de daño DI_N de la Figura 9; Estos umbrales se basan en el daño observado en función del índice de daño de Park y Ang (1985) para edificios de concreto armado. La Figura 10 muestra estos umbrales sobre la curva de Índice de Daño del modelo DI_N mostrado en la Figura 9. Para determinar los desplazamientos normalizados se supone que el desplazamiento último Du corresponde a un índice de daño de 0.7. Una vez determinados los umbrales de los diferentes estados de daño, para cuantificar la probabilidad de excedencia de cada uno de ellos correspondiente al 50%, se formula la hipótesis de que el daño se distribuye de forma binomial; esto permite determinar las probabilidades de excedencia de los otros estados de daño.

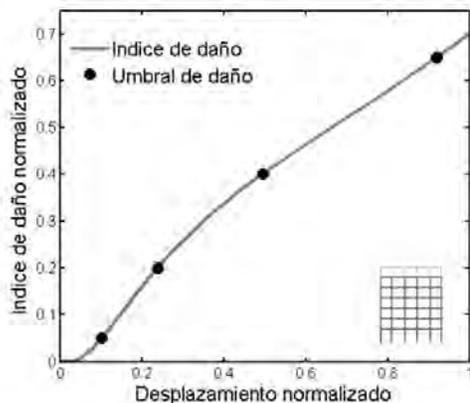


Figura 10. Umbral de los estados de daño del sistemas 7 niveles – 5 vanos.

La Figura 11 muestra las curvas de fragilidad de los modelos mejorados en los sistemas porticados que corresponden a los umbrales definidos mediante el modelo de daño $IDcc$. En la escala de desplazamientos (eje de abscisas) se ha colocado como valor máximo 50 cm a fin de ajustarse al máximo valor de desplazamiento último du de todos los sistemas analizados.

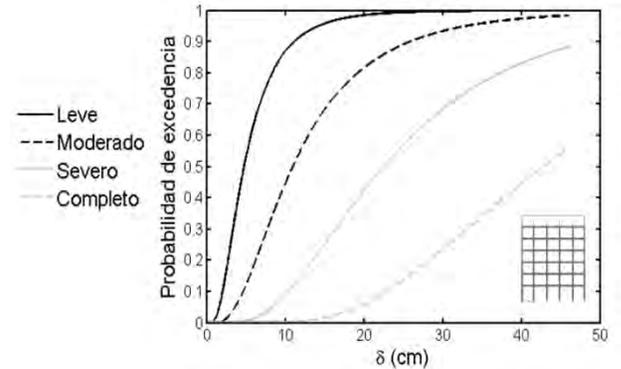


Figura 11. Curvas de fragilidad según modelo de Pujades et al. (2014) en el sistema 7 niveles – 5 vanos.

4.5 Índice de daño medio.

Las probabilidades de ocurrencia de un determinado estado de daño j , definida como $P_{(j)}$, se pueden obtener a partir de las curvas de fragilidad restando de la curva de fragilidad del grado de daño j la correspondiente al grado de daño $j+1$, para $j = 0, 1, 2, 3$ donde 0 corresponde al estado o grado de daño nulo, cuya curva de fragilidad es igual a la unidad. Este procedimiento es utilizado para representar el daño global esperado en una edificación o en un conjunto de edificaciones y ha sido usado para representar la distribución geográfica del daño esperado en entornos urbanos para escenarios sísmicos, tal como lo han hecho por ejemplo, Barbat y col., (2005) y Lantada y col., (2010) entre otros. Esto es importante para esta investigación en el sentido que las edificaciones y modelos analizados son típicas de entornos urbanos de la zona geográfica en la que se enmarca este estudio. La Figura 12 muestra las curvas del grado de daño d de dos de los sistemas de 7 niveles obtenidas a partir de las curvas de fragilidad del modelo Pujades y col., (2014). Es notorio cómo el modelo de daño basado en la propuesta *Risk-UE* tiende a subestimar los grados de daño cercanos al daño nulo mientras tiende a sobreestimar los niveles de daño intermedio subestimando ligeramente el daño completo. Esto ya había observado en los modelos de daño experimentales detallados en (Ugel2014). En la Figura 13 se muestran las gráficas de daño medio de los modelos de daño *Risk UEyIDcc* de todos los sistemas porticados. Se evidenció que en ambos edificios, los sistemas que presentan mayor probabilidad de daños son los que tienen mayor relación altura/ancho (esbeltez); esto está directamente relacionado a la cantidad de ejes resistentes verticales (ejes de columnas).

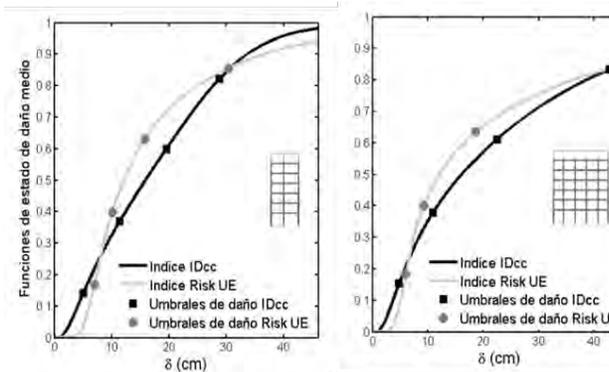


Figura 12. Curvas de daño medio en dos de los sistemas de 7 niveles.

Es importante destacar que el modelo *5 niveles* y *5 vanos* es el único que tiene voladizos en todos los pisos y en ambos extremos; coherentemente muestra daños bastante mayores que los otros sistemas para desplazamientos pequeños; en desplazamientos mayores, desde aproximadamente 13 cm, comienza a mostrar el comportamiento antes descrito. Por otro lado, la función incremento de la probabilidad de daño tiene en todas las curvas un trazado gráfico muy similar, con la notoria excepción del mencionado modelo que muestra probabilidades de daños casi inmediatas en el índice *IDcc*, mientras que en el índice *Risk UE* no se observa esta característica.

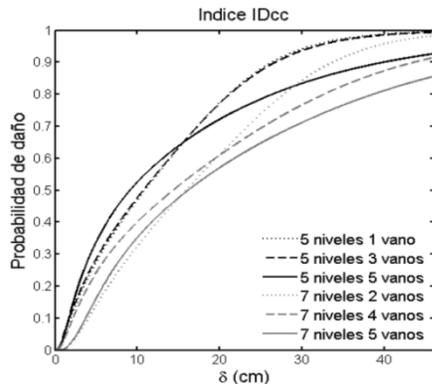


Figura 13. Daño medio según el modelo de daño *IDcc*

Es claro que los modelos estructurales de 5 niveles presentan mayores probabilidades de daño en relación con los modelos de 7 niveles. Esta tendencia se observa claramente en el índice *IDcc* desde desplazamientos muy pequeños y se acentúa a partir de aproximadamente 4-5 cm. Por otra parte, destaca el comportamiento de los sistemas *5 niveles - 5 vanos* y *7 niveles - 2 vanos* que disminuyen y aumentan respectivamente la pendiente de crecimiento de daño en la medida que aumentan los desplazamientos y se incursiona en los estados inelásticos del comportamiento. Esto es significativo por cuanto esos sistemas son los que tiene mayor y menor esbeltez en cada edificio, lo cual reafirma que la relación altura/ancho de los sistemas es un pa-

rámetro clave. Con todo, hay que hacer notar que para una determinada acción sísmica los desplazamientos esperados pueden ser distintos y, en consecuencia, los daños esperados pueden seguir patrones diferentes para diferentes acciones sísmicas.

4.6 Enfoque probabilista.

El índice de daño *IDcc* (Pujades y col., 2014), expresado en función de desplazamientos, permite relacionar esta probabilidad de daño con las aceleraciones pico (PGA) del análisis dinámico. (Figura 14).

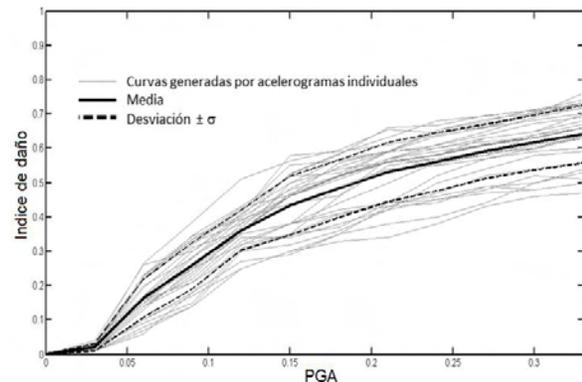


Figura 14. Daño medio *IDcc* en los sistemas de 7 niveles.

La Figura 14 muestra que la probabilidad de daño medio evoluciona con tendencias muy similares en los sistemas estructurales analizados, sea usándose como variables independientes el desplazamiento lateral o la aceleración pico PGA. En la Figura 15 se muestran las curvas *IDcc* vs PGA de los modelos *5 niveles - 1 vano* y *7 niveles - 5 vanos*, mostrando la media y la dispersión asociada a este análisis. Se observa que la dispersión del daño aumenta en proporción a la aceleración pero a la vez es independiente de la magnitud del daño infligido; esto es consistente con lo planteado por (Vargas y col., 2013). Se distinguen las etapas en el crecimiento del daño con un crecimiento inicial muy leve, luego hay rápido crecimiento hasta aproximadamente 0.10 g y después el crecimiento de daño se hace más gradual. Estos cambios están asociados a las etapas elásticas e inelásticas de la capacidad.

En el crecimiento del daño influyó de manera fundamental la condición de rigidez de los pórticos, entendiéndose esta rigidez en función de la capacidad de absorción de energía. Ante similares configuraciones de elementos estructurales (vigas, columnas, longitudes y conexiones), esta condición tiene como indicador la esbeltez (relación alto/ancho) del pórtico y es clara la tendencia en la que la probabilidad de daño es mayor en la medida que crece dicha esbeltez. Este parámetro determinista se relaciona en términos probabilistas a través de la media de los acelerogramas utilizados en el pórtico (Figura 15). Así, en el modelo *5 niveles - 1 vano* (13.50 m de altura), la probabilidad de daño

es significativamente mayor que en el modelo 7 niveles – 5 vanos a pesar que este último tiene 22 m de altura.

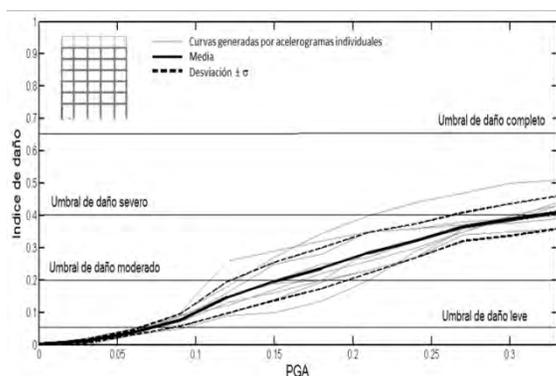


Figura 15. Curvas de daño medio en el sistema 7 niveles – 5 vanos.

5 Conclusiones

De las estructuras analizadas, en las de 6 o más niveles se observó claramente la incursión en modos superiores de vibración de los desplazamientos y deformaciones generados en los análisis estáticos y dinámicos, confirmando que la importancia de los modos superiores crece con la altura y esbeltez de los edificios. Así, en las curvas de capacidad obtenidas son consideradas las contribuciones de los modos altos de vibración junto con la resistencia localizada y características modales de los pórticos inducidas por acumulación progresiva del daño. De esta forma los términos y valores asociados a la degradación de rigidez, el alargamiento de los períodos y la influencia de los modos de vibración superiores han permitido obtener resultados que han sido cotejados, comparados y validados en términos de confiabilidad estructural con los obtenidos de la aplicación del modelo paramétrico de Pujadesy col., (2014), en las edificaciones y modelos detallados en Ugel2015.

Es muy significativo constatar que en los modelos de 6 o más niveles los niveles de acero generan desplazamientos relativos muy diferenciados con respecto a los encontrados en los otros niveles. Esta última característica se hizo más evidente al compararse estos desplazamientos con los de edificaciones idénticas pero con el último nivel de concreto armado analizados sólo para este fin. Esto sugiere que el cambio de rigidez de los materiales es un factor fundamental en estos desplazamientos desacoplados, pero no implica que sea un limitante en el desempeño estructural de la edificación; es decir, valores mayores de ductilidad y disipación de energía que en edificaciones equivalentes de concreto armado, no implican peor comportamiento, siempre y cuando se tengan las previsiones adecuadas desde el punto de vista del control de desplazamientos.

Se observó que el deterioro principal de la capacidad de los sistemas se produce en los elementos de concreto armado, específicamente en las columnas que, al ser sometidas a cargas laterales, deben desarrollar esfuerzos de trac-

ción; esto fue también observado en los especímenes experimentales de (Ugel2015). De esta forma, desde el punto de vista de concentración de daño, las columnas de concreto armado en las uniones mixtas, por ser mucho más rígidas (frágiles) que las de acero, representan el punto clave de la capacidad, pues es allí donde se producen los mayores esfuerzos de tracción, rotación y torsión en los sistemas. Por otra parte, las uniones mixtas y los elementos de acero no dejaron de incrementar su capacidad con la acción cíclica aplicada. Esto es consistente con lo observado en los modelos experimentales antes descritos y comprueba que la unión mixta se mantiene rígida hasta el colapso. Como resultado de la respuesta rígida en las uniones mixtas, la continuidad estructural entre la columna de acero y la de concreto armado, puede producir daños (agrietamientos por tracción y corte) en ésta última debido a la mayor ductilidad y deformabilidad del acero en comparación con la fragilidad de la columna de concreto.

La revisión de los parámetros referentes a la degradación de rigidez, la disipación de energía y el daño asociado a ello, permitió concluir que los niveles superiores de acero pueden continuar soportando cargas sin alcanzar su cortante último mientras que algunos de los elementos de concreto ya han entrado en su etapa de degradación post-fluencia. En las comparaciones entre los modelos de fragilidad y daño del Proyecto Risk UE y el Índice de daño IDcc, los grados de daño medio obtenidos mediante ambos modelos mostraron una notoria tendencia en el modelo basado en la propuesta Risk-UE a subestimar los grados de daño cercanos al daño nulo mientras tiende a sobreestimar los grados de daño intermedios. Se encontró que el índice de daño IDcc permitió diferenciar comportamientos particulares de algunos sistemas estructurales con configuraciones estructurales únicas con respecto a las demás, al generar una gráfica de probabilidad de daño muy diferenciada en comparación a las otras. Por último, la evolución del daño en términos probabilistas mostró que independientemente de la variable utilizada para medir la probabilidad (desplazamientos o PGA) el comportamiento de la función daño IDcc es coherente con lo mostrado en términos deterministas.

Agradecimientos

Los autores agradecen muy especialmente a los directores de tesis doctoral en Ingeniería sísmica y Dinámica estructural de la Universitat Politècnica de Catalunya; también al Consejo de Investigación CDCHT de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado.

Referencias

- Antoniou S, Pinho R, 2004, Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based pushover procedures. Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 4.pp 497/522
- ATC 40 2005, Improvement of nonlinear static seismic

- analysis procedures. Applied Technology Council (ATC). Report No. FEMA-440, Washington, DC.
- Barbat, A. H., Pujades, L. G., Lantada, N. y Moreno, R. 2005. Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: application to Barcelona. *Soil DynEarthqEng* 28: pp 851–865
- Barbat AH, Carreño ML, Pujades LG, Lantada N, Cardona OD, Marulanda MC, 2010, Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area, *Structure and Infrastructure Engineering*, 6, 1–2. pp 17–38.
- Barbat AH, Carreño ML, Cardona OD, Marulanda MC, 2011, Evaluación holística del riesgo sísmico en zonas urbanas, *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 27(1). pp 3-27.
- Carreño ML, Cardona OD, Barbat AH, 2012, New methodology for urban seismic risk assessment from a holistic perspective, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(2). pp 547–565.
- Chellini G, De Roeck G, Nardini L, Salvatore W, 2010, Damage analysis of a steel-concrete composite frame by finite element model updating”. *Journal of Constructional Steel Research* 66. pp 398-411.
- COVENIN 1756:01, 2001, “Edificaciones resistentes”. Fondo Norma. Caracas.
- FEMA 2009, National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP). Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-750). Federal Emergency Management Agency. Washington, D.C.
- Kreslin M, Fajfar P, 2010, Seismic evaluation of a existing complex RC building”. *Bulletin of earthquake engineering*, Volume 8, Number 2. pp 363-385.
- Lagomarsino S, Giovinazzi S, 2005, Macro seismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bull EarthqEng* 4(4). pp 415–443
- Lantada N, Irizarry, J, Barbat AH, Goula X, Roca A, Susagna T, Pujades L, 2010, Seismic Hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method. *Bull EarthqEng* 8(2). pp 201–229.
- Marulanda M, Cardona OD, Barbat AH, 2009, Robustness of the holistic seismic risk evaluation in urban centers using the USRi”, *Natural Hazards*, 49(3). pp 501-516.
- Milutinovic ZV, Trendafiloski GS, 2003, WP04 Vulnerability of current buildings RISK-UE project of the EC: an advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns.
- Moreno R, 2006, Evaluación del Riesgo Sísmico en Edificios Mediante Análisis Estático no Lineal: Aplicación a Escenarios Sísmicos de Barcelona. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Mwafy AM, Elnashai A, 2002, Calibration of Force Reduction Factors of RC Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 6: 2. pp 239 — 273
- Papanikolaou V, Elnashai A, 2005, Evaluation of conventional and adaptive pushover analysis I: Methodology. *Journal of Earthquake Engineering*, 9: 6. pp 23 - 941
- Park Y, Ang A, 1985, Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete. *J. Struct. Eng.*, 111(4). pp 722–739.
- PEER, 2013. NGA Database. Pacific Earthquake Engineering Research Center. CEE 227 - Earthquake Engineering. University of California. Berkeley. UC Regents.
- Pinho R, Bhatt C, Antoniou S, Bento R, 2008, Modeling of the horizontal slab of a 3D irregular building for nonlinear static assessment. 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Pujades LG, Barbat AH, González-Drigo R, Avila J, Lagomarsino S, 2012, Seismic performance of a block of buildings representative of the typical construction in the Eixample district in Barcelona (Spain), *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(1). pp 331–349.
- Pujades LG, Vargas-Alzate YF, Barbat AH, González-Drigo JR, 2014, Parametric model for capacity curves. *Bulletin of Earthquake Engineering*. Published online 13. sept. 2014. DOI 10.1007/s10518-014-9670- 2014. 32 p.
- SEAOC, 1995, Structural Engineers Association of California. Vision 2000: A framework for performance-based engineering. Sacramento, CA.
- SEISMOSOFT, 2014, SeismoStruct—A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures”. From: <http://www.seismosoft.com>.
- Song J, Ellingswood B, 2009, Seismic Reliability of Special Moment Steel Frames with Welded Connections: I & II. *Journal of structural engineering*. Vol. 125 No 4. April/2009. Papers No 18266 & 18267.
- Ugel R, 2015, Vulnerabilidad sísmica en edificaciones porticadas compuestas de acero y concreto armado. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Vamvatisikos D, Cornell C, 2002, Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 31. pp 491–514.
- Vargas YF, Pujades LG, Barbat AH, Hurtado JE, 2013, Evaluación probabilista de la capacidad, fragilidad y daño sísmico en edificios de concreto armado, *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 29(2). pp 63-78.

Ugel, Ronald: *Dr en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural en la Universitat Politècnica de Catalunya, España; Prof. Titular en Universidad Centro occidental Lisandro Alvarado.*

Herrera, Reyes Indira: *Ingeniero Civil, Especialista en Ingeniería Estructural, Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado; Prof. Asociado en Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Correo electrónico: hreyes@ucla.edu.ve*

Capítulo 90

Propiedades termodinámicas de fluidos puros mediante una ecuación de estado Lee-Kesler re-escalada

Derjani Bayeh, Sylvana¹; Olivera Fuentes, Claudio^{1*}

¹Grupo TADiP, Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia,
 Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

*claudio@usb.ve

Resumen

El método de Lee y Kesler (1975) es una formulación analítica del principio de estados correspondientes de tres parámetros (PEC-3P) de Pitzer y col. (1955). Es aplicable a los fluidos llamados "normales", cuyas propiedades dependen linealmente del factor acéntrico ω y se obtienen por interpolación entre las de dos fluidos de referencia: uno liviano ("simple") con $\omega = 0$. y uno pesado (n-octano) con $\omega = 0.3978$, cada uno modelado por una ecuación de estado de tipo Benedict-Webb-Rubin. En el presente trabajo, se demuestra que estas ecuaciones de referencia presentan leves desajustes que inciden sobre la predicción de las envolventes de fases: (1) no cumplen con precisión las condiciones de estabilidad límite en el punto crítico, y (2) los factores acéntricos calculados difieren de los valores nominales. Para corregir estos detalles, se re-escalan los coeficientes de las mencionadas ecuaciones, incrementando su precisión hasta 12 cifras significativas y cumpliendo dentro de estos márgenes los criterios críticos. Se obtienen las curvas de saturación, se correlacionan mediante ecuaciones de tipos Riedel y Wagner y se reajustan los factores acéntricos. Con estas nuevas ecuaciones de referencia, se generan tablas de factores de compresibilidad, entalpías y entropías residuales, y coeficientes de fugacidad para ambos fluidos. Finalmente, se obtienen las curvas espinodales de los dos fluidos y se demuestra que la interpolación para fluidos normales falla en la vecindad del punto crítico, locual es una limitación no reportada previamente del PEC-3P de Pitzer.

ISBN: 978-980-11-1858-9



9 789801 118589

1 Introducción

En el principio de estados correspondientes de tres parámetros ("PEC-3P") según Pitzer y col. (1955), el factor de compresibilidad de los fluidos "normales" se supone dependiente de sus propiedades reducidas ($T_r = T/T_c, P_r = P/P_c$) y de un parámetro característico llamado factor acéntrico, definido en términos de la presión de saturación como:

$$\omega = -1 - \log_{10}(P_r^{sat} @ T_r = 0.7)$$

tal que:

$$P_r^{sat} = 10^{-(1+\omega)} = \frac{0.1}{10^\omega} @ T_r = 0.7$$

Esta definición proviene del hecho experimental de que la presión reducida de saturación de los gases nobles o inertes, que son fluidos no polares y de moléculas esféricas (tales como Ar, Kr, Xe, Rn, pero no He ni en cierta medida Ne, para los cuales son importantes los efectos cuánticos), es muy cercana a 10% de su presión crítica cuando su temperatura es 70% de su temperatura crítica. Esta conducta no se cumple para otras sustancias, que pueden ser más volátiles (si $\omega < 0 \Rightarrow P_r^{sat} > 0.1 @ T_r = 0.7$) o menos volátiles (si $\omega > 0 \Rightarrow P_r^{sat} < 0.1 @ T_r = 0.7$) que un gas noble. De esta manera, el factor acéntrico de un fluido proporciona una medida de la desviación de sus propiedades con respecto a las de los gases nobles, ya sea por la geometría no esférica, por la polaridad de sus moléculas, o por ambas razones.

Debido a limitaciones tanto en la cantidad como en la calidad de los datos PVT disponibles para la época, Pitzer y col. (1955) consideraron suficiente representar la ecuación de estado mediante una expansión en serie truncada en el término de primer orden, vale decir suponer una dependencia lineal del factor de compresibilidad Z con respecto a ω .

$$Z(T_r, P_r; \omega) \approx Z(T_r, P_r; 0) + \omega \frac{\partial Z}{\partial \omega}(T_r, P_r; 0)$$

El primer término de la expansión representa el factor de compresibilidad de un fluido de factor acéntrico nulo; este valor que corresponde a los gases nobles no cuánticos se acerca también a la conducta de algunos gases livianos no polares como N_2 , O_2 e incluso CH_4 . Pitzer designó a estos compuestos con el nombre genérico de *fluidos simples*. El segundo término es la desviación de primer orden; la ecuación se escribe más usualmente en la forma equivalente:

$$Z(T_r, P_r; \omega) = Z^{(0)}(T_r, P_r) + \omega Z^{(1)}(T_r, P_r)$$

lo que no altera el significado de los dos términos de la expansión; simplemente, la función $Z^{(1)}$ es la primera derivada de la función Z evaluada en $\omega = 0$. Los fluidos que obedecen la Ec. (4) se denominan habitualmente *fluidos normales*. Pitzer y col. (1955) determinaron las funciones $Z^{(0)}$ y $Z^{(1)}$ por ajuste numérico de datos experimentales de una varie-

dad de tales fluidos. Los resultados fueron presentados solamente en forma de gráficas y tablas, porque una formulación analítica mediante ecuaciones explícitas para ambas funciones se consideraba fuera del alcance de las ecuaciones de estado conocidas en ese entonces.

Lee y Kesler (1975) notaron que la forma lineal de la Ec. (4) permite interpretar el PEC-3P como un procedimiento de interpolación lineal entre las propiedades de dos fluidos de referencia. Si las propiedades de estos fluidos se denotan respectivamente con los superíndices $(R1)$ y $(R2)$, se tiene:

$$Z^{(R1)}(T_r, P_r) = Z^{(0)}(T_r, P_r) + \omega^{(R1)} Z^{(1)}(T_r, P_r)$$

$$Z^{(R2)}(T_r, P_r) = Z^{(0)}(T_r, P_r) + \omega^{(R2)} Z^{(1)}(T_r, P_r)$$

Resolviendo para las funciones $Z^{(0)}$ y $Z^{(1)}$ y sustituyendo en la Ec. (4), el factor de compresibilidad de cualquier otro fluido normal se puede expresar como:

$$Z(T_r, P_r; \omega) = \frac{\omega - \omega^{(R2)}}{\omega^{(R1)} - \omega^{(R2)}} Z^{(R1)}(T_r, P_r) + \frac{\omega - \omega^{(R1)}}{\omega^{(R2)} - \omega^{(R1)}} Z^{(R2)}(T_r, P_r)$$

Naturalmente, dichos autores seleccionaron como uno de los fluidos de referencia ("liviano") el propio fluido simple, $\omega = 0$, cuyas propiedades establecieron como un promedio empírico de la conducta de (principalmente) Ar, Kr y CH_4 . El otro fluido de referencia ("pesado") fue n-octano, $\omega = 0.3978$, por ser el fluido menos volátil para el cual se disponía de datos experimentales suficientemente extensos y confiables. De esta forma, la Ec. (4) quedó expresada como:

$$Z(T_r, P_r; \omega) = Z^{(0)}(T_r, P_r) + \frac{\omega}{\omega^{(r)}} [Z^{(r)}(T_r, P_r) - Z^{(0)}(T_r, P_r)]$$

Las ecuaciones de estado desarrolladas por los autores para representar los estados líquidos y gaseosos del fluido simple [superíndice (0)] y del n-octano [superíndice (r)] fueron del tipo Benedict-Webb-Rubin (1940) en forma reducida:

$$Z = \frac{P_r V_r}{T_r} = 1 + \frac{B}{V_r} + \frac{C}{V_r^2} + \frac{D}{V_r^3} + \frac{E}{V_r^2} \left(\beta + \frac{\gamma}{V_r} \right) \exp\left(-\frac{\gamma}{V_r}\right)$$

Donde B, C, D, E son funciones de la temperatura dadas por:

$$B = b_1 - \frac{b_2}{T_r} - \frac{b_3}{T_r^2} - \frac{b_4}{T_r^3}$$

$$C = c_1 - \frac{c_2}{T_r} + \frac{c_3}{T_r^3}$$

$$D = d_1 + \frac{d_2}{T_r}$$

$$E = \frac{e_4}{T_r^3} \quad (4)$$

$y\beta, \gamma, b, c, d$, son constantes propias de cada fluido de referencia, dadas en la publicación original y reproducidas en la Tabla 1 por conveniencia. En la notación empleada por Lee y Kesler, V_r no es el verdadero volumen reducido V/V_c sino un volumen molar adimensional definido como:

$$V_r = \frac{P_c}{RT_c} V = Z \frac{T_r}{P_r}$$

que en el punto crítico debe hacerse igual al factor de compresibilidad crítica Z_c . El conjunto de las Ecs. (7) a (10) constituye la "ecuación de estado Lee-Kesler" (LK).

Para fines posteriores, conviene escribir también las expresiones para las derivadas parciales de la presión con respecto al volumen a temperatura constante:

$$\left(\frac{P_r}{T_r}\right)' \equiv \frac{1}{T_r} \left(\frac{\partial P_r}{\partial V_r}\right)_{T_r} = -\frac{1}{V_r^2} \left(1 + \frac{2B}{V_r} + \frac{3C}{V_r^2} + \frac{6D}{V_r^5}\right) + \frac{E}{V_r^4} \left[-3\beta + (2\beta - 5) \frac{\gamma}{V_r^2} + 2 \frac{\gamma^2}{V_r^4}\right] \exp\left(-\frac{\gamma}{V_r^2}\right)$$

$$\left(\frac{P_r}{T_r}\right)'' \equiv \frac{1}{T_r} \left(\frac{\partial^2 P_r}{\partial V_r^2}\right)_{T_r} = \frac{2}{V_r^3} \left(1 + \frac{3B}{V_r} + \frac{6C}{V_r^2} + \frac{21D}{V_r^5}\right) + \frac{2E}{V_r^5} \left[6\beta - (9\beta - 15) \frac{\gamma}{V_r^2} + (2\beta - 13) \frac{\gamma^2}{V_r^4} + 2 \frac{\gamma^3}{V_r^6}\right] \exp\left(-\frac{\gamma}{V_r^2}\right)$$

TABLA 1. Constantes de la ecuación LK (Lee y Kesler, 1975)

	Fluido simple	N-octano
b_1	0.1181193	0.2026579
b_2	0.265728	0.331511
b_3	0.154790	0.027655
b_4	0.030323	0.203488
c_1	0.0236744	0.0313385
c_2	0.0186984	0.0503618
c_3	0.0	0.016901
c_4	0.042724	0.041577
d_1	0.155488E-4	0.48736E-4
d_2	0.623689E-4	0.0740336E-4
β	0.65392	1.226
γ	0.060167	0.03754

2 Modificación de la ecuación de estado LK

2.1 Análisis y re-escalamiento del punto crítico

El punto crítico de un fluido marca las máximas condiciones de temperatura y presión a las cuales es posible observar el cambio de fase líquido-vapor y el equilibrio entre ambas fases. El criterio clásico que define este punto es que la isoterma que lo contiene tenga allí un punto de inflexión:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)_T = 0 \quad @ \quad T = T_c, V = V_c$$

Para ecuaciones de estado explícitas en la presión, la solución de este par de ecuaciones permite hallar la temperatura y el volumen crítico, y sustituyendo estos en la propia ecuación de estado se obtiene la correspondiente presión crítica:

$$P = P_c \quad @ \quad T = T_c, V = V_c$$

En versión adimensional, los criterios adoptan la forma:

$$\left(\frac{\partial P_r}{\partial V_r}\right)_{T_r} = \left(\frac{\partial^2 P_r}{\partial V_r^2}\right)_{T_r} = 0 \quad @ \quad T_r = 1, V_r = Z_c$$

$$P_r = 1 \quad @ \quad T_r = 1, V_r = Z_c$$

La Ec. (8) con los parámetros de la Tabla 1 no satisfacen exactamente estas condiciones. Las Figuras 1 y 2 muestran las curvas de P_r/T_r , $(P_r/T_r)'$ y $(P_r/T_r)''$ para el fluido simple y para el n-octano, respectivamente, en función de V_r para $T_r = 1$. Para ayudar a la visualización, se ha graficado la diferencia $P_r/T_r - 1$ y se han escalado los valores para que tengan órdenes de magnitud similares. Si las condiciones críticas se cumplieran en forma exacta, las tres curvas deberían cortarse en un mismo punto, de coordenadas $V_r = Z_c$ en el eje horizontal y cero en el eje vertical, que debería ser también el punto más alto (máximo) de la primera derivada. En la Figura 1 se puede ver que la isoterma $T_r = 1$ para el fluido simple LK es en realidad supercrítica, porque la primera derivada es negativa y no se hace nula; alcanza su máximo valor para $V_r \approx 0.2905$ (donde la segunda derivada se hace cero), pero para este volumen la presión reducida es mayor que la unidad. Por el contrario, para el n-octano $T_r = 1$ ni la pendiente ni la curvatura de la isoterma son cero. Todo esto permite concluir que el verdadero punto crítico debe hallarse a alguna temperatura inferior, $T_r < 1$.

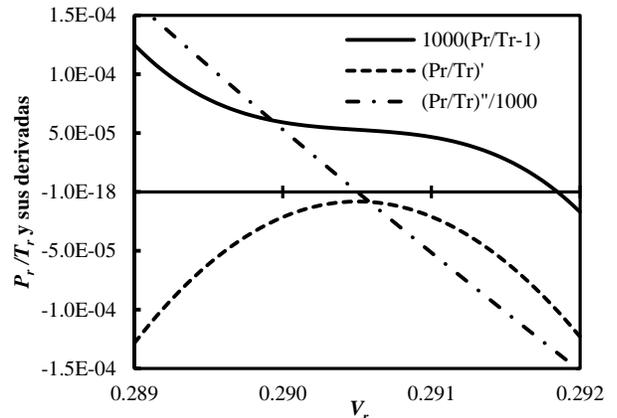


Fig. 1. Isoterma y sus derivadas para el fluido simple LK a $T_r = 1$

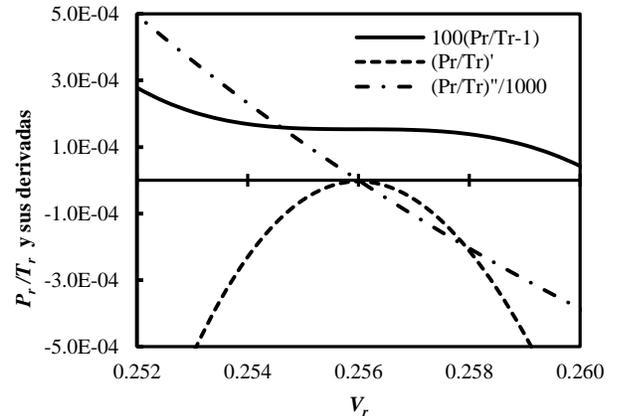


Fig. 2. Isoterma y sus derivadas para el n-octano LK a $T_r = 1$

Tampoco la conducta del n-octano es completamente satisfactoria. Aunque en la Figura 2 se observa en apariencia que la primera derivada se hace cero para $V_r \approx 0.2560$, (15)

en realidad el valor máximo alcanzado por esta derivada es ligeramente negativo ($\approx -3.37\text{E-}6$), y el correspondiente valor de la presión es $P_r > 1$, con una desviación aun más notoria que para el fluido simple. Nuevamente, se concluye que la verdadera temperatura crítica debe hallarse en $T_r < 1$.

Es preciso enfatizar que estas imperfecciones de la ecuación LK son muy pequeñas y tienen un impacto ínfimo en las aplicaciones prácticas de este modelo termodinámico en ingeniería. Sin embargo, constituyen desajustes conceptuales y teóricos que vale la pena subsanar. El procedimiento es exactamente el mismo que se seguiría para convertir cualquier ecuación de estado dimensional a su correspondiente forma reducida. A este efecto, las variables en las ecuaciones LK originales se visualizan como “seudopropiedades” (en un sistema ficticio de unidades tal que la constante universal de los gases R es unitaria) que requieren ser reescaladas para convertirlos en verdaderas propiedades reducidas, dividiéndolas por las verdaderas coordenadas críticas respectivas. Denotando las variables en las ecuaciones originales por el superíndice “LK”, se determinan primeramente los valores críticos correctos $T_{rc}^{LK} = \Theta$ y $V_{rc}^{LK} = \Lambda$ para ambos fluidos, resolviendo las Ecs. (11) y (12) de acuerdo con la Ec. (15), y se sustituyen en la Ec. (8) para obtener $P_{rc}^{LK} = \Pi$. Los valores resultantes se muestran en la Tabla 2. Las propiedades reducidas correctas se obtienen entonces como:

$$T_r = \frac{T_r^{LK}}{\Theta}, \quad P_r = \frac{P_r^{LK}}{\Pi}, \quad V_r = Z \frac{P_r}{T_r} = \frac{\Pi V_r^{LK}}{\Theta}$$

es decir, las variables en las Ecs. (8) y (9) se reemplazan de la siguiente forma:

$$T_r^{LK} := T_r \Theta, \quad P_r^{LK} := P_r \Pi, \quad V_r^{LK} := \frac{\Theta}{\Pi} V_r$$

Tabla 2. Puntos críticos de los fluidos LK originales

	Fluido simple	N-octano
T_{rc}	0,999999715737	0,999999924499
P_{rc}	0,999998332843	1,00000088120
$V_{rc} = Z_c$	0,290500859	0,255998860

Como se ve, estas sustituciones no alteran el valor del factor de compresibilidad, que es una verdadera propiedad adimensional. En particular, el re-escalamiento preserva el valor original de Z_c . Finalmente, los valores de los factores de escala (propiedades críticas) Θ y Π se absorben dentro de las constantes de los fluidos de referencia, resultando los nuevos coeficientes:

$$\beta = \beta^{LK}, \quad \gamma = \gamma^{LK} \frac{\Pi^2}{\Theta^2}$$

$$b_1 = b_1^{LK} \frac{\Pi}{\Theta}, \quad b_2 = b_2^{LK} \frac{\Pi}{\Theta^2}, \quad b_3 = b_3^{LK} \frac{\Pi}{\Theta^3}, \quad b_4 = b_4^{LK} \frac{\Pi}{\Theta^4} \tag{18b}$$

$$c_1 = c_1^{LK} \frac{\Pi^2}{\Theta^2}, \quad c_2 = c_2^{LK} \frac{\Pi^2}{\Theta^3}, \quad c_3 = c_3^{LK} \frac{\Pi^2}{\Theta^5}, \quad c_4 = c_4^{LK} \frac{\Pi^2}{\Theta^5} \tag{18c}$$

$$d_1 = d_1^{LK} \frac{\Pi^5}{\Theta^5}, \quad d_2 = d_2^{LK} \frac{\Pi^5}{\Theta^6} \tag{18d}$$

De esta forma, las ecuaciones de referencia LK re-

escaladas están dadas por las mismas Ecs. (8) a (10), pero con las constantes listadas en la Tabla 3. Comparando las Tablas 1 y 3 se ve que los cambios son en efecto muy menores, y podría decirse que lo que hacen, en términos prácticos, es aumentar la precisión de las constantes de Lee y Kesler hasta doce cifras significativas (excepto β , que es invariante).

Las nuevas isothermas críticas y sus derivadas se ilustran en las Figuras 3 y 4. Como se puede ver, las condiciones del punto crítico se satisfacen ahora correctamente a $T_r = 1$.

2.2 Equilibrio de fases y factor acéntrico

Todo el resto de este trabajo utiliza la forma reescalada de la ecuación LK. Para el equilibrio entre líquido y vapor, de respectivos volúmenes molares V_f y V_g , a una temperatura

TABLA 3. Nuevas constantes para la ecuación LK

	R1, referencia liviano (fluido simple)	R2, referencia pesado (n-octano)
b_1	0.118119136653	0.202658093883
b_2	0.265727708063	0.331511342186
b_3	0.154789873944	0.0276550306335
b_4	0.0303229839256	0.203488240768
c_1	0.0236743345216	0.0313385599631
c_2	0.0186983535994	0.0503619001647
c_3	0.0	0.0169010361665
c_4	0.0427239182690	0.0415770889708
d_1	1.55486924885E-05	4.87362331292E-05
d_2	6.23684864821E-05	7.40339597302E-06
β	0.65392	1.226
γ	0.0601668335909	0.0375400718291

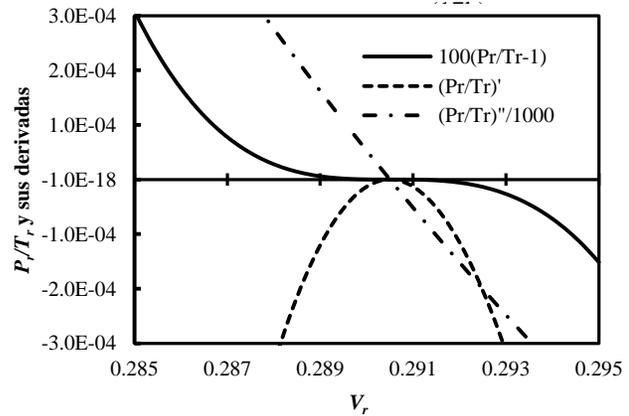


Fig.3. Isotherma crítica y sus derivadas para el fluido LK liviano a $T_r = 1$ con las nuevas constantes de la Tabla 3 (18a)

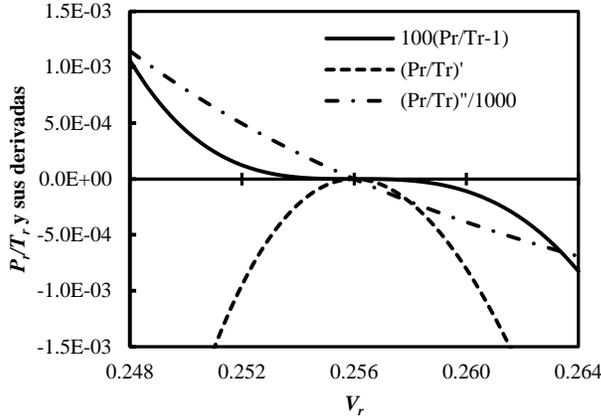


Fig. 4. Isoterma crítica y sus derivadas para el fluido LK pesado a $T_r = 1$ con las nuevas constantes de la Tabla 3

subcrítica T deben cumplirse los requisitos de igualdad de presiones P_f y P_g , e igualdad de energías molares de Gibbs (potenciales químicos) G_f y G_g . Estos criterios pueden escribirse en forma de dos condiciones para la ecuación de estado $P(T, V)$:

$$\Phi(V_f, V_g) = P(T, V_g) - P(T, V_f) = 0$$

$$\Psi(V_f, V_g) = G(T, V_g) - G(T, V_f) = 0$$

La Ec. (20) es equivalente al criterio de igualdad de fugacidades, y la presión que se obtiene al resolver la Ec. (19) es la presión de saturación P_{sat} a la temperatura T . Se puede demostrar que este sistema de ecuaciones conduce al criterio de igualdad de áreas o construcción de Maxwell. En efecto, considerando la derivada termodinámica:

$$\left(\frac{\partial G}{\partial V}\right)_T = V \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T$$

la Ec. (20) se puede reescribir como:

$$\Psi(V_f, V_g) = \int_{V_f}^{V_g} V \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T dV = \int_{V_f}^{V_g} V dP$$

Integrando por partes:

$$\int_{V_f}^{V_g} V dP = V_g P(T, V_g) - V_f P(T, V_f) - \int_{V_f}^{V_g} P(T, V) dV$$

Reemplazando la presión en los dos primeros términos por P_{sat} , de acuerdo con la Ec. (19), y sustituyendo en la Ec. (20) resulta:

$$P_{sat}(V_g - V_f) = \int_{V_f}^{V_g} P(T, V) dV$$

que es el criterio de Maxwell. En lugar de resolver el sistema de las Ecs. (19) y (20), entonces, se puede resolver la única Ec. (24). La diferencia práctica radica en que en el primer caso se itera sobre dos variables (V_f, V_g) y en el segundo caso sobre una sola (P_{sat}), aunque resolviendo a cada paso la ecuación de estado $P(T, V)$ para hallar los volúmenes de las fases. Este último método es más habitual cuando se trata de ecuaciones de estado sencillas, como las ecuaciones cúbicas, para las cuales es relativamente directo determinar

todas las raíces de volumen a P y T dadas. En el presente caso, dada la mayor complejidad de la ecuación LK, el número de raíces no está acotado de antemano; por ejemplo, a temperaturas y presiones reducidas bajas pueden aparecer cinco raíces de volumen, de las cuales las tres intermedias deben descartarse, porque se generan por deformación del lazo de van der Waals en la región inestable. La Figura 5 ilustra esta situación para el fluido liviano a $T_r = 0.35$ y $P_r/T_r = 0.05$. Es necesario puntualizar que este comportamiento no es consecuencia de la reparametrización, ya que se presenta igualmente para la ecuación LK original. Por esta razón se aplicará más bien el primero de los dos métodos, que se presta mejor para restringir la región de volúmenes factibles y determinar las curvas de saturación completas de ambos fluidos.

Es evidente de las Ecs. (19) y (22) que los criterios de equilibrio pueden escribirse también en variables reducidas:

$$\phi(V_{rf}, V_{rg}) = \frac{P_{rg}}{T_r} - \frac{P_{rf}}{T_r} = 0$$

$$\psi(V_{rf}, V_{rg}) = \int_{V_{rf}}^{V_{rg}} V_r \left(\frac{\partial P_r/T_r}{\partial V_r}\right)_{T_r} dV_r = 0$$

Este sistema se resuelve por el método Newton-Raphson en dos variables. Dados unos estimados iniciales de los volúmenes V_{rf} y V_{rg} , se realiza una expansión de primer orden para las funciones ϕ y ψ , y se determinan los cambios ΔV_{rf} y ΔV_{rg}

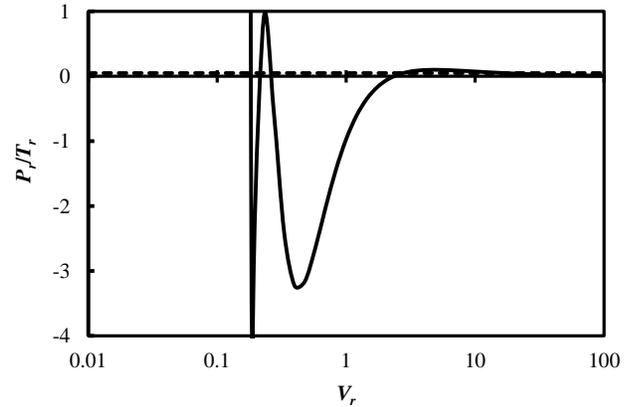


Fig. 5. Raíces quintuples de volumen para el fluido liviano LK a $T_r = 0.35$. La línea segmentada corresponde a $P_r/T_r = 0.05$.

necesarios para que ambas funciones se hagan cero:

$$0 - \phi \approx \frac{\partial \phi}{\partial V_{rf}} \Delta V_{rf} + \frac{\partial \phi}{\partial V_{rg}} \Delta V_{rg} \quad (24)$$

$$0 - \psi \approx \frac{\partial \psi}{\partial V_{rf}} \Delta V_{rf} + \frac{\partial \psi}{\partial V_{rg}} \Delta V_{rg}$$

Las derivadas parciales son:

$$\frac{\partial \phi}{\partial V_{rf}} = - \left(\frac{P_r}{T_r}\right)'_f = - \frac{1}{T_r} \left(\frac{\partial P_r}{\partial V_r}\right)_{T_r, V_r=V_{rf}}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial V_{rg}} = \left(\frac{P_r}{T_r}\right)'_g = \frac{1}{T_r} \left(\frac{\partial P_r}{\partial V_r}\right)_{T_r, V_r=V_{rg}}$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial V_{rf}} = -V_{rf} \left(\frac{P_r}{T_r}\right)'_f$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial V_{rg}} = V_{rg} \left(\frac{P_r}{T_r}\right)'_g$$

y la solución para los incrementos de volumen es:

$$\Delta V_{rf} = \frac{\phi V_{rg} - \psi}{(V_{rg} - V_{rf}) \left(\frac{P_r}{T_r}\right)'_f}$$

$$\Delta V_{rg} = \frac{\phi V_{rf} - \psi}{(V_{rg} - V_{rf}) \left(\frac{P_r}{T_r}\right)'_g}$$

La evaluación de la función ψ requiere integrar la ecuación de estado. La forma más práctica es hacerlo por partes:

$$\psi(V_{rf}, V_{rg}) = \frac{P_{rg}V_{rg} - P_{rf}V_{rf}}{T_r} - [I(V_{rg}) - I(V_{rf})]$$

con

$$I(V_r) \equiv \int \frac{P_r}{T_r} dV_r = \ln V_r - \frac{B}{V_r} - \frac{C}{2V_r^2} - \frac{D}{5V_r^5} + \frac{E}{2Y} (\beta + 1 + \frac{Y}{V_r^2}) \exp(-\frac{Y}{V_r^2})$$

La resolución sistemática de las Ecs. (25) y (26) [o (32)] genera el diagrama completo de fases líquido-vapor, es decir, $P_{r,sat}$, V_{rf} y V_{rg} como funciones de T_r . Por conveniencia, los cálculos se inician desde el punto crítico donde $P_{r,sat} = 1$ y $V_{rf} = V_{rg} = Z_c$ para $T_r = 1$. A medida que T_r disminuye, $P_{r,sat}$ y V_{rf} también decrecen, y V_{rg} aumenta. La Tabla 4 es una breve tabla de saturación para ambos fluidos de referencia.

Tabla 4. Estados saturados de los fluidos LK

T_r	Fluido liviano			Fluido pesado		
	$P_{r,sat}$	Z_L	Z_G	$P_{r,sat}$	Z_L	Z_G
1.00	1.00000	0.29050	0.29050	1.00000	0.25600	0.25600
0.95	0.73755	0.13176	0.56789	0.66313	0.10075	0.58906
0.90	0.53392	0.08999	0.67030	0.42971	0.06123	0.70808
0.85	0.37515	0.06211	0.74548	0.26599	0.03702	0.79308
0.80	0.25358	0.04205	0.80593	0.15478	0.02146	0.85803
0.75	0.16323	0.02747	0.85590	0.08312	0.01164	0.90775
0.70	0.09879	0.01704	0.89722	0.04023	0.00575	0.94457
0.65	0.05527	0.00985	0.93069	0.01700	0.00250	0.97012
0.60	0.02794	0.00519	0.95672	0.00601	0.00092	0.98613
0.55	0.01236	0.00241	0.97569	0.00167	0.00027	0.99477
0.50	0.00457	0.00095	0.98822	0.00034	0.00006	0.99852
0.45	0.00132	0.00029	0.99536	0.00004	0.00001	0.99972
0.40	0.00027	0.00006	0.99865	0.00000	0.00000	0.99997
0.35	0.00003	0.00001	0.99975	-	-	-
0.30	0.00000	0.00000	0.99998	-	-	-

Tomando en particular los valores de $P_{r,sat}$ a la "temperatura omega" $T_r = 0.70$ y aplicando la Ec. (1), se obtienen los factores acéntricos calculados o predichos para cada fluido:

$$\omega^{(R1)} = 0.0052953, \quad \omega^{(R2)} = 0.39547$$

Las ecuaciones LK originales dan resultados similares, es decir, aunque están diseñadas para representar fluidos con factor acéntrico 0 y 0.3978 respectivamente, estos valo-

res difieren de los calculados rigurosamente con los criterios de equilibrio líquido-vapor. Por consistencia, entonces, resulta preferible descartar los valores asignados a priori por Lee y Kesler (en particular el valor cero para el fluido liviano), y aplicar el PEC-3P en la forma no de la Ec. (7), sino de la Ec. (6) con los factores acéntricos de la Ec. (34). Nótese que esto significa que las propiedades de un verdadero fluido simple (es decir, con ω exactamente igual a cero) deben calcularse por extrapolación, tal como para los fluidos con $\omega > \omega^{(R2)}$.

Lee y Kesler (1975) presentaron ecuaciones auxiliares de tipo Riedel para las presiones de saturación de ambos fluidos de referencia:

$$\ln P_{r,sat} = k_1 + \frac{k_2}{T_r} + k_3 \ln T_r + k_4 T_r^6$$

pero no obtuvieron los coeficientes de la Ec. (34) correlacionando las presiones de saturación generadas con su misma ecuación de estado mediante el cálculo de equilibrio, sino datos tomados de fuentes externas. Como consecuencia, las Ecs. (8) y (34) con las constantes originales no son plenamente consistentes entre sí. La discrepancia es mayor para el fluido simple, para el cual las Ecs. (33) y (44) se desarrollaron a partir de grupos diferentes de compuestos; por ejemplo, la Ec. (34) para el fluido simple evaluada a $T_r = 1$ da $P_{r,sat} = 1.000007$ y el error se incrementa conforme disminuye la temperatura. Llegando a 35.4% a $T_r = 0.30$. Por este motivo, y para garantizar la máxima consistencia termodinámica, se desarrollan a continuación nuevas correlaciones para las presiones de saturación de ambos fluidos, basadas en los resultados del método de Maxwell arriba descrito. Se utiliza una versión de la ecuación de Riedel (1954) con un coeficiente ajustable extra (el exponente del último término):

$$\ln P_{r,sat} = k_1 + \frac{k_2}{T_r} + k_3 \ln T_r + k_4 T_r^{k_5}$$

y también, como alternativa, una versión de la ecuación de Wagner (1973):

$$\ln P_{r,sat} = \frac{1-T_r}{T_r} [h_1 + h_2(1-T_r)^{1/2} + h_3(1-T_r)^2 + h_4(1-T_r)^5]$$

En ambos casos, la ecuación se "ancla" en dos puntos característicos, que son la temperatura crítica ($T_r = 1$) y la temperatura omega ($T_r = 0.7$), donde deben cumplirse las respectivas condiciones:

$$\ln P_{r,sat} = 0 \quad @ \quad T_r = 1$$

$$\ln P_{r,sat} = -(1 + \omega) \ln 10 \quad @ \quad T_r = T_\omega = 0.7$$

esta última correspondiente a la definición del factor acéntrico, Ecs. (1) y (2). Con estas restricciones, la Ec. (36) se reduce a solo tres coeficientes independientes, y es por esto que se ha dejado libre el exponente del último término, para no limitar excesivamente la flexibilidad de este modelo. Tomando k_1 y k_2 como dependientes, se tiene:

$$k_2 = -\frac{7}{3} \left[(1 + \omega) \ln 10 + k_3 \ln T_\omega + k_4 (T_\omega^{k_5} - 1) \right]$$

$$k_1 = -(k_2 + k_4)$$

Por su parte, la Ec. (37) contiene solo cuatro coeficientes ajustables, pero cumple automáticamente la condición crítica de la Ec. (38). Por lo tanto, la imposición adicional de la Ec. (39) la deja también con solo tres coeficientes independientes. Tomando h_1 como dependiente, se tiene:

$$h_1 = -\left[\frac{7}{3} (1 + \omega) \ln 10 + h_2 T_\omega^{1/2} + h_3 T_\omega^2 + h_4 T_\omega^5 \right]$$

Se presentan en la Tabla 5 los coeficientes de las Ecs. (36) y (37) obtenidos minimizando para cada fluido la desviación absoluta fraccional promedio (AARD):

$$AARD = \frac{1}{N} \sum_j \left| \frac{P_{r,sat,correl} - P_{r,sat,Maxwell}}{P_{r,sat,Maxwell}} \right|$$

Se observa que ambos modelos dan ajustes de precisión comparable, con leves ventajas de la Ec. (36) para el fluido liviano y de la Ec. (37) para el fluido pesado. La desviación promedio es mayor para el fluido pesado, porque sus presiones de saturación son menores (es menos volátil) y por lo tanto los errores fraccionales, especialmente a las temperaturas más bajas, se magnifican debido a los pequeños valores en los denominadores de la Ec. (43). En las Figuras 6 y 7 se muestran los errores porcentuales del ajuste con respecto a las presiones de equilibrio. Vale la pena resaltar que la Ec. (36) con exponente k_5 ajustable arroja desviaciones un orden de magnitud menores que si se fija $k_5 = 6$ propuesto por Riedel (1954) y empleado por Lee y Kesler (1975).

Tabla 5. Correlaciones de presión de saturación de los fluidos LK

	Fluido liviano	Fluido pesado
Riedel, Ec. (36)		
k_1	6.17872469850	12.3525633815
k_2	-7.08732834241	-13.1200898205
k_3	-3.53203260297	-8.43288848186
k_4	0.908603643904	0.767526438970
k_5	2.50776126072	4.23561025601
AARD	0.00083	0.00352
Wagner, Ec. (37)		
h_1	-6.11875978305	-8.33495624538
h_2	1.51890719583	2.42794157763
h_3	-1.24101358970	-5.45160411063
h_4	-1.08537155444	-0.69425994071
AARD	0.00088	0.00315

Adicionalmente, se proponen correlaciones para los volúmenes de las fases en equilibrio como funciones de la temperatura. Para el líquido saturado, luego de comparar varios modelos, se seleccionó una versión reducida de la correlación propuesta por Yen y Woods (1966), pero con exponente crítico conforme al estudio teórico de Landau y Lifshitz (1980):

$$V_{rf} = \frac{Z_c}{1 + \sum_{k=1}^4 m_k (1 - T_r)^{k/2}}$$

Para el vapor saturado resultó preferible una versión de mayor orden y en términos del factor de compresibilidad:

$$Z_{rg} = Z_c \left[1 + \sum_{k=1}^6 m_k (1 - T_r)^{k/2} \right] \quad (40)$$

Los coeficientes de las Ecs. (44) y (45) se listan en la Tabla 6.

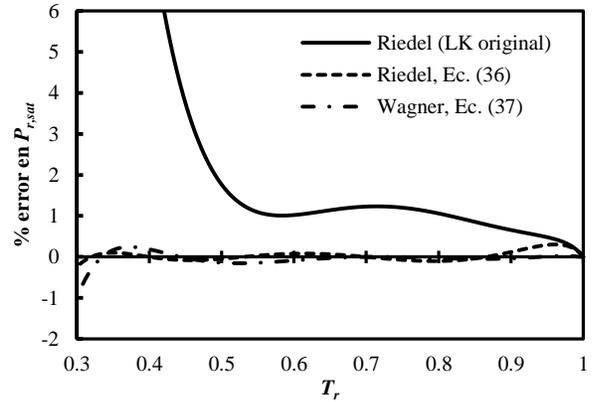


Fig. 6. Error porcentual de la correlación de $P_{r,sat}$ para el fluido liviano

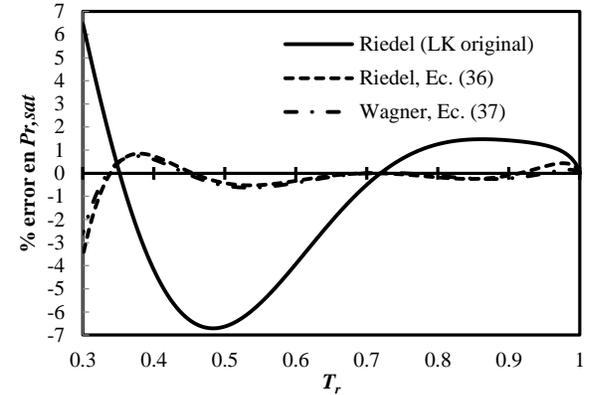


Fig. 6. Error porcentual de la correlación de $P_{r,sat}$ para el fluido pesado

Tabla 6. Correlaciones de volumen de saturación de los fluidos LK

	Fluido liviano	Fluido pesado
Líquido saturado, Ec. (44)		
m_1	4.23054099	5.13202060
m_2	-5.63558169	-10.4775649
m_3	4.81686052	15.9670696
m_4	-0.224108467	-8.13173421
AARD	0.00393	0.00255
Vapor saturado, Ec. (45)		
m_1	4.50705939	7.11095062
m_2	1.32202487	-9.89041967
m_3	-21.0241528	23.5361403
m_4	63.4010366	-21.4474579
m_5	-80.6555050	-13.2275497
m_6	35.1506486	17.5957587
AARD	0.000458	0.000560

2.3 Otras propiedades termodinámicas

(44)
Dada la forma explícita en presión de las ecuaciones de estado de los fluidos de referencia, la determinación de sus propiedades residuales (para igual volumen) se hace más

fácilmente a partir de la expresión para la energía de Helmholtz:

$$\frac{A-A^*}{RT} = \int_{\infty}^{V_r} \frac{1-Z}{V_r} dV_r = \frac{B}{V_r} + \frac{C}{2V_r^2} + \frac{D}{5V_r^5} + \frac{E}{2\gamma} \left[\beta + 1 - \left(\beta + 1 + \frac{\gamma}{V_r^2} \right) \exp\left(-\frac{\gamma}{V_r^2}\right) \right]$$

La energía interna se obtiene como:

$$\frac{U-U^*}{RT} = -T_r \left[\frac{\partial}{\partial T_r} \left(\frac{A-A^*}{RT} \right) \right]_{V_r} = -T_r \left\{ \frac{dB/dT_r}{V_r} + \frac{dC/dT_r}{2V_r^2} + \frac{dD/dT_r}{5V_r^5} + \frac{dE/dT_r}{2\gamma} \left[\beta + 1 - \left(\beta + 1 + \frac{\gamma}{V_r^2} \right) \exp\left(-\frac{\gamma}{V_r^2}\right) \right] \right\}$$

donde:

$$\frac{dB}{dT_r} = \frac{b_2}{T_r^2} + \frac{2b_3}{T_r^3} + \frac{3b_4}{T_r^4}$$

$$\frac{dC}{dT_r} = \frac{c_2}{T_r^2} - \frac{3c_3}{T_r^4}$$

$$\frac{dD}{dT_r} = -\frac{d_2}{T_r^2}$$

$$\frac{dE}{dT_r} = -\frac{3c_4}{T_r^4}$$

La entalpía y entropía residuales, y el coeficiente de fugacidad, resultan entonces directamente como:

$$\frac{H-H^*}{RT} = \frac{U-U^*}{RT} + Z - 1$$

$$\frac{S-S^*}{R} = \frac{U-U^*}{RT} - \frac{A-A^*}{RT}$$

$$\ln \phi = Z - 1 - \ln Z + \frac{A-A^*}{RT}$$

Empleando estas relaciones, se han construido tablas de propiedades para los fluidos LK re-escalados, análogas a las tradicionales y cubriendo la región $0.3 \leq T_r \leq 4$, $0.01 \leq P_r \leq 10$. Debido a su extensión, estas tablas no se incluyen aquí, pero pueden ser solicitadas directamente a los autores. En general, como ya se ha dicho, la reparametrización introduce cambios muy menores en la ecuación de estado, de forma que dentro de la precisión con que tradicionalmente se reportan estas propiedades (3 o 4 cifras significativas), los nuevos valores coinciden sustancialmente con los basados en la ecuación LK original, con solo algunas discrepancias aisladas. Una de ellas, que vale la pena mencionar, ocurre para el fluido liviano, que al tener un factor acéntrico $\omega^{(R1)} = 0.0052953$ es menos volátil que un fluido simple, y por lo tanto a $T_r = 0.7$ y $P_r = 0.1$ no se encuentra en estado de saturación sino como líquido subenfriado.

2.4 Estados metaestables y curvas espinodales

Las curvas espinodales marcan los límites de estabilidad absoluta de un fluido, vale decir las condiciones a las cuales una perturbación infinitesimal es suficiente para ocasionar la vaporización de un líquido metaestable (curva espinodal del líquido), o la condensación de un vapor metaestable (curva espinodal del vapor). En el diagrama presión-

volumen, corresponden a los puntos extremos (máximo para el líquido y mínimo para el vapor) del lazo de van der Waals en cada isoterma:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T = 0 \quad (46)$$

o equivalentemente, en coordenadas reducidas:

$$\left(\frac{P_r}{T_r} \right)' \equiv \left(\frac{\partial P_r/T_r}{\partial V_r} \right)_{T_r} = 0$$

Evidentemente, los estados espinodales existen únicamente a temperaturas subcríticas, y las curvas espinodales de líquido y vapor convergen hacia el punto crítico donde se cumple la Ec. (15). Precisamente, la unión del máximo y el mínimo del lazo de van der Waals en un único punto hace que el punto crítico sea un punto de inflexión, es decir, de curvatura (segunda derivada) nula como implica la Ec. (15).

La importancia práctica de los puntos espinodales radica en que la presión de saturación debe necesariamente hallarse entre las dos presiones espinodales. Las curvas espinodales predichas por la ecuación de estado pueden así servirdecotas o guías en los cálculos de equilibrio líquido-vapor. Es interesante notar que las ecuaciones de estado de tipo explícito en la presión, o sea de la forma $P = P(T, V)$, predicen en general que las presiones espinodales de líquido se hacen negativas por debajo de cierta temperatura relativamente elevada ($T_r = 0.910215$ para el fluido liviano y 0.935211 para el fluido pesado en el presente caso). Tales presiones negativas han sido confirmadas experimentalmente, pero no revisten importancia para el presente análisis, por lo cual la curva espinodal del líquido será determinada solamente en la zona de presiones no negativas. En el caso del vapor, en cambio, las presiones espinodales son siempre positivas, tendiendo asintóticamente a cero en el límite de densidad nula (volumen infinito) correspondiente a gas ideal. En las Figuras 7 y 8 se muestran las curvas espinodales de líquido y vapor obtenidas a partir de la Ec. (53) para los fluidos LK liviano y pesado. Se incluye en cada gráfica la correspondiente curva de saturación, para resaltar que es en efecto intermedia entre ambos límites espinodales. Las presiones espinodales pueden correlacionarse mediante polinomios simples de la temperatura reducida, "anclados" en el punto crítico:

$$P_r = 1 - \sum e_k (1 - T_r)^k$$

Para la fase líquida es suficiente una aproximación cuadrática, dado el estrecho rango de temperaturas de interés, pero la fase vapor requiere polinomios de orden mayor. Los respectivos coeficientes se listan en la Tabla 7.

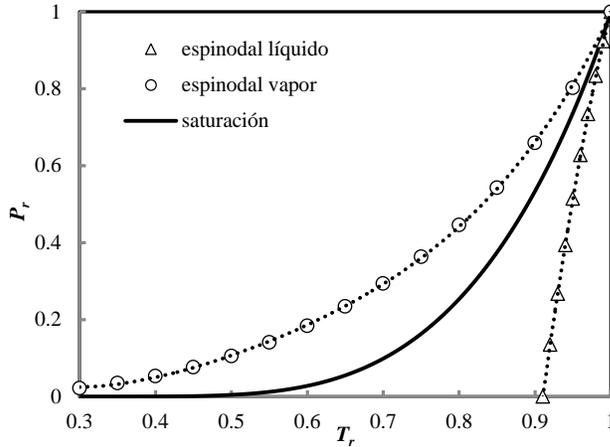


Fig. 7. Curvas espinodales y de saturación del fluido liviano

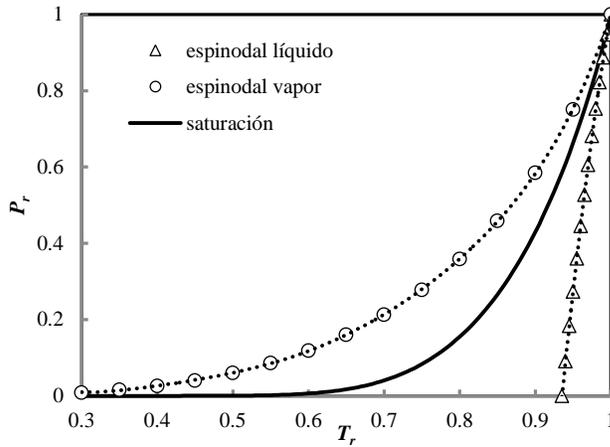


Fig. 8. Curvas espinodales y de saturación del fluido pesado

Tabla 7. Correlaciones espinodales de los fluidos LK

	Fluido liviano	Fluido pesado
Espinodal de líquido		
e_1	7.781710E+00	1.111021E+01
e_2	3.780049E+01	6.730870E+01
R^2	0.99992	0.99994
Espinodal de vapor		
e_1	4.402103E+00	5.652621E+00
e_2	-1.200566E+01	-1.837223E+01
e_3	2.470719E+01	3.945568E+01
e_4	-2.907944E+01	-4.643451E+02
e_5	1,361405E+01	2.173965E+02
R^2	0.99996	0.99998

Un aspecto adicional de suma relevancia, concerniente a los estados metaestables, surge al aplicar la Ec. (6) a la predicción de propiedades de fluidos normales. Si $\omega^{(R1)} < \omega < \omega^{(R2)}$, el fluido en cuestión será menos volátil que el LK liviano (R1), pero más volátil que el LK pesado (R2). Considérese entonces el problema de estimar las propiedades de saturación de dicho fluido a una T_r subcrítica cualquiera y la $P_{r,sat}$ respectiva. Para el líquido saturado, ello

implica interpolar entre las propiedades del líquido R1 y las del líquido R2, pero el primero es un estado metaestable, porque $P_{r,sat} < P_{r,sat}^{(R1)}$. A la inversa, para el vapor saturado se debe interpolar entre las propiedades del vapor R1 y las del vapor R2, pero el segundo es un estado metaestable, porque $P_{r,sat} > P_{r,sat}^{(R2)}$. La necesidad de disponer de valores de las propiedades de los fluidos de referencia en las regiones metaestables no ha sido señalada claramente en la mayoría de las presentaciones del método LK. Solo recientemente se han propuesto tablas que incluyen valores para estados metaestables relativamente cercanos a la saturación, pero limitadas a factores de compresibilidad (Poling y col., 2008).

Una situación extrema se presenta en las inmediaciones de la temperatura crítica, donde las presiones espinodales de líquido y vapor convergen hacia la unidad, de forma que el intervalo entre ambas presiones (el lazo de van der Waals, donde existen raíces de volumen de tipos tanto líquido como vapor) se hace muy estrecho. Como además el lazo del fluido liviano se presenta a presiones más altas que aquel del fluido pesado, puede suceder que ambos intervalos no se superpongan, si la presión espinodal de líquido del fluido liviano es mayor que la presión espinodal de vapor del fluido pesado. Como se muestra en la Figura 9, esto ocurre a partir de $T_r \approx 0.9956$. Entre esta temperatura y la crítica, no es posible aplicar la Ec. (6) ni para líquido (porque no existe líquido liviano, ni siquiera metaestable) ni para vapor (porque no existe vapor pesado, ni siquiera metaestable). Una vez más, es preciso enfatizar que esta conducta no es consecuencia de la reparametrización, ya que ocurre igualmente con las constantes LK originales, y es en realidad una limitación del principio de estados correspondientes en la forma propuesta por Pitzer y col. (1955). Algunos autores han observado esta situación sin llegar a identificar sus causas. Así, por ejemplo, Assael y col. (1996) presentaron una subrutina en FORTRAN para cálculos con la ecuación LK original, pero advirtieron que debía evitarse su uso en las cercanías del punto crítico, mencionando problemas de convergencia. Similarmente, Plöcker et al. (1978), en una extensión del método LK a sistemas multicomponentes, reportaron problemas para los cálculos en la región crítica (para $T_r > 0.96$), atribuyéndolos a la naturaleza empírica de las reglas empleadas para definir las propiedades críticas de las mezclas. Cabe suponer que la verdadera causa haya sido la inexistencia de raíces volumétricas para ambas fases a tales condiciones.

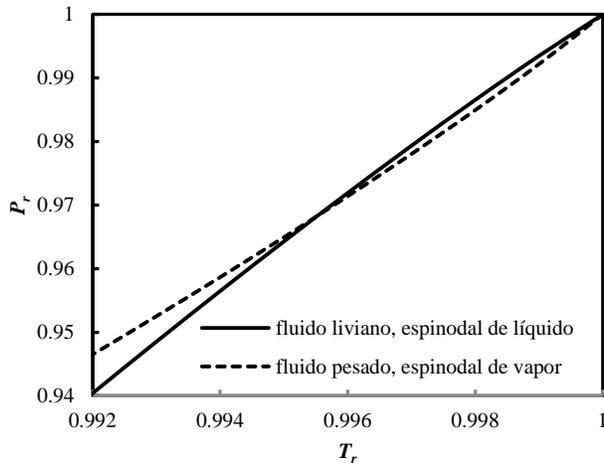


Fig. 9. Cruce de las curvas espinodales de los fluidos LK

3 Comentarios y conclusiones

Se han identificado en este trabajo inconsistencias leves, pero significativas, de las ecuaciones propuestas por Lee y Kesler (1975) para aplicación analítica del principio de estados correspondientes de Pitzer y col. (1955). Las isothermas $T_r = 1$ no cumplen en forma exacta los criterios termodinámicos de estabilidad límite en el punto crítico, y las isothermas $T_r = 0.7$ no reproducen los factores acéntricos esperados para los fluidos de referencia. Adicionalmente, las ecuaciones auxiliares para las presiones de saturación no satisfacen adecuadamente el criterio de isofugacidad en el equilibrio líquido-vapor.

Para superar estas limitaciones, se han re-escalado las ecuaciones, obteniendo nuevas constantes para los fluidos de referencia liviano y pesado que mejoran la precisión y la consistencia interna del método LK. Se han obtenido los estados de saturación, y se han propuesto nuevas correlaciones para las presiones y volúmenes de los fluidos en el equilibrio líquido-vapor, identificando también los valores correctos de sus factores acéntricos. Las ecuaciones reparametrizadas han sido empleadas para generar tablas de propiedades residuales y coeficientes de fugacidad. Estas tablas no se apartan significativamente de las tradicionales disponibles en la literatura, excepto por algunos valores aislados derivados de la mejor representación de la volatilidad, en especial del fluido de referencia liviano que ya no es exactamente un fluido simple.

El análisis del comportamiento de los fluidos en la región cercana a la saturación ha demostrado la necesidad de disponer también de los valores de las propiedades de los fluidos de referencia en condiciones metaestables, a fines de poder llevar a cabo las interpolaciones requeridas por la Ec. (6), que debe ser empleada en lugar de la Ec. (7). Esta conclusión es aun más válida si se requiere aplicar el método LK a compuestos menos volátiles que el fluido de referencia pesado, vale decir con $\omega > \omega^{(R2)}$. En un futuro trabajo, se espera abordar el análisis más detallado de los criterios y

precauciones a adoptar en el uso de la ecuación LK para fluidos normales.

Diversos autores han reportado problemas computacionales en el uso del método LK en la vecindad del punto crítico. Independientemente de que las explicaciones dadas en cada caso sean valideras, en este trabajo se ha demostrado que la causa más probable es la inexistencia de raíces de volumen de una o ambas fases, debido a falta de superposición de los lazos de van der Waals de los fluidos de referencia.

Finalmente, es importante señalar que este trabajo no constituye ni una refutación ni una desautorización del principio de estados correspondientes de Pitzer y col., o de su implementación analítica por Lee y Kesler. Ambas técnicas tienen una larga tradición de uso exitoso en cálculos de ingeniería, y la renormalización efectuada en el presente trabajo no introduce cambios dramáticos en su aplicación, contribuyendo solo a afinar su precisión hasta un grado cónsono con las actuales herramientas computacionales, y a consolidar su consistencia y apego a los criterios termodinámicos.

Referencias

- Assael MJ, Trusler JPM, Tsolakis TF, 1996, Thermophysical Properties of Fluids, Imperial College Press, London, UK, p.93.
- Benedict M, Webb GB, Rubin LC, An empirical equation for thermodynamic properties of light hydrocarbons and their mixtures I. Methane, ethane, propane and nbutane, J. Chem. Phys., Vol. 8, pp. 334-345.
- Landau LD, Lifshitz EM, 1980, Course of Theoretical Physics, Vol. 5 Statistical Physics, Part 1, 3^a ed, Pergamon Press, Oxford, UK, pp. 506-509.
- Lee BI, Kesler MG, 1975, A generalized thermodynamic correlation based on three-parameter corresponding states, AIChE J., Vol. 21, No. 3, pp. 510-527.
- Maxwell JC, 1875, On the dynamical evidence of the molecular constitution of bodies, Nature, Vol. 11 (March 4), pp. 357-359.
- Pitzer KS, Lippmann DZ, Curl Jr RF, Huggins CM, Petersen D E, 1955, The volumetric and thermodynamic properties of fluids. II. Compressibility factor, vapor pressure and entropy of vaporization, J. Am. Chem. Soc., Vol. 77, pp. 3433-3440.
- Plöcker U, Knapp H, Prausnitz J, 1978, Calculation of high-pressure vapor-liquid equilibria from a corresponding-states correlation with emphasis on asymmetric mixtures, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., Vol. 17, No. 3, pp. 324-332.
- Poling BE, Thomson GH, Friend DG, Rowley RL, Wilding WV, 2008, Physical and Chemical Data, Sec. 2 en Green D W, Perry RH, Perry's Chemical Engineers' Handbook, 8^a ed., McGraw-Hill, New York, USA, pp. 2-500-2-501.
- Riedel L, 1954, Eine neue universelle Dampfdruckformel, Chemie-Ing.-Techn., Vol. 26, No. 2, pp. 83-89.
- Wagner W, 1973, New vapour pressure measurements for

argón and nitrogen and a new method for establishing rational vapour pressure equations, *Cryogenics*, Vol. 13, No. 8, pp. 470-482.

Yen LC, Woods SS, 1966, A generalized equation for computer calculation of liquid densities, *AIChE J* Vol. 12, No. 1, pp. 95-99.

Derjani Bayeh, Sylvana: *B.S. Chemical Engineering, U Wisconsin (Madison), USA (1989). M.S. Chemical Engineering, U. Iowa, USA (1995). Correo electrónico: sderjani@usb.ve*

Olivera Fuentes, Claudio: *Ingeniero Civil Químico, UTFSM, Chile (1974). MSc Chemical Engineering, UMIST, Inglaterra (1976). Profesor Emérito de la Universidad Simón Bolívar.*

Capítulo 91

Caracterización hidrogeológica del acuífero localizado dentro de la poligonal urbana de la ciudad de Guanare, del estado Portuguesa

Ramírez, Daniel^{*}; Valera, Edgar¹; Hervé, Jegat²; Molina, Germán¹; Rivas, Daniel¹; Meza, Hillary¹

¹Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica

²Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial

Mérida, Venezuela.

*danielramirz@gmail.com

Resumen

En el centro occidente de Venezuela, se encuentran numerosos acuíferos a pocos metros de la superficie terrestre, que almacenan grandes cantidades de agua. Por otro lado, el crecimiento exponencial demográfico en los últimos años se ha ejecutado sin ningún tipo de planificación innumerables pozos profundos y estos no han tenido una óptima análisis de calidad para el consumo humano y sus diversos usos en la región, pues tan solo se ha cubierto las necesidades del recurso hídrico sin tomar provisiones de las consecuencias que acarrearía. La presente investigación tiene como objeto generar un modelo hidrogeológico conceptual, evaluar las posibles recargas y cuantificar las reservas de agua subterránea del acuífero localizado dentro de la poligonal urbana de la ciudad de Guanare. El primer paso, es elaborar los perfiles litológicos de los pozos, suministrados por perforaciones realizadas al momento de su construcción, luego se generaran secciones estratigráficas abarcando la mayor extensión, finalmente es utilizado el Sistema de Información Geográfica (SIG) para representar de manera simple e ideal en una imagen virtual en 3D las condiciones reales aproximadas del acuífero. De los resultados obtenidos se concluye que las reservas permanentes son permeables, las cuales arrojan un total de $420 \times 10^6 \text{ m}^3$, la mayor recarga se genera por la precipitación natural, la cual se infiltra en el subsuelo hasta lograr percolar en el acuífero un total aproximado de $105 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$. El aporte proveniente del piedemonte y del río, corresponde a valores menores, $4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ y $8,4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ respectivamente. Los mayores espesores y transmisibilidades están al este y sureste de la zona, sitio que por excelencia posee características potenciales para el resguardo y/o almacenamiento del agua subterránea para futuras explotaciones.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

Hoy en día en la ciudad de Guanare del estado Portuguesa, es cada vez mayor el uso del agua como recurso, no sólo en el ámbito urbano donde dicho uso puede llegar a ser del 100% sino también en el agrícola, ganadero e industrial. Adicionalmente se ha tomado en cuenta el crecimiento poblacional, razón por la cual es de vital importancia administrar adecuadamente este recurso e impulsar su uso racional; a fin de optimizar su aprovechamiento frente a la demanda, evitando un nivel de sobre-explotación que afecte a largo plazo los volúmenes de agua del acuífero.

La presente investigación está enfocada al desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual, donde se evalúa el comportamiento, basado en la información geológica e hidrogeológica del acuífero ubicado en la poligonal urbana de la ciudad de Guanare del estado Portuguesa. Un modelo hidrogeológico ofrece un panorama extensivo de la información sintetizada, la cual puede ser muy valiosa en la toma de decisiones para la prospección, el aprovechamiento, conservación, protección y, en general, la gestión integrada de los recursos hídricos.

2 Marco referencial

2.1 Antecedentes

Por medio de revisiones documentales tanto de fuentes impresas como digitales se logró constatar que algunos autores han desarrollado investigaciones de esta naturaleza en diversas perspectivas como:

Rodríguez, B. (2013), en su trabajo, “Lineamientos de gestión ambiental para el manejo de las aguas subterráneas en la ciudad de Guanare, Edo. Portuguesa”; ejecutó la evaluación de las características fisicoquímicas y bacteriológicas del acuífero, de acuerdo con las normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua.

Vivas, D. (2007), en su trabajo “Análisis de la susceptibilidad a la contaminación del acuífero de la ciudad de Guanare, Edo. Portuguesa”; empleó diferentes parámetros de vulnerabilidad con el objeto de generar zonas propensas a contaminarse en el acuífero; estableciendo perímetros de protección de los pozos del área de estudio.

Así mismo, Su Ah Sor, R. (2006) en su trabajo denominado “Evaluación la cantidad y calidad de agua del acuífero de la Ciudad de Guanare”; empleó pruebas de bombeo utilizando el método de Jacob, para determinar características hidrogeológicas; de igual forma represento valores de transmisibilidad.

2.2 Ubicación del área de estudio

El área de estudio se localiza en el centro occidente de Venezuela, en la región del piedemonte andino, en el municipio Guanare del estado Portuguesa. La figura 1 se ubica geográficamente entre las coordenadas 413795 Este,

994639 Norte; 413795 Este, 1003635 Norte; 3423950 Este, 1003635 Norte; 4423950 Este, 994639 Norte; bajo el datum REGVEN y posee una extensión de 91km², sin embargo el área de mayor interés posee aproximadamente 65km².

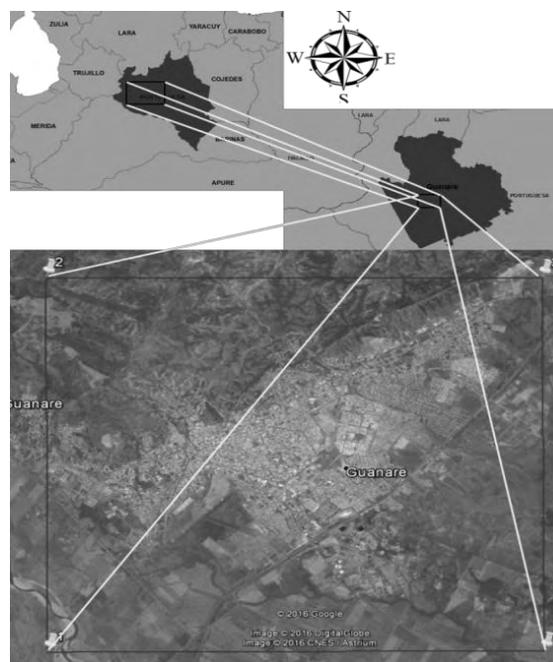


Fig. 1. Ubicación del área en estudio.

La hidrografía de la ciudad de Guanare, por estar geográficamente ubicada en medio de dos grandes ríos: Guanare y Portuguesa, y por la presencia de varias quebradas que corren en dirección norte sur, presenta inundaciones anuales que afectan a los barrios y urbanizaciones de la zona sureste y suroeste de la ciudad.

La vegetación está representada por pequeños bosques y pastizales arbolados. Los bosques se encuentran ubicados principalmente entre colinas y siguiendo los cursos de quebradas intermitentes. El clima corresponde atropical lluvioso de Sabana; con lluvias abundantes sobre los meses de junio hasta noviembre y con un periodo de estiaje durante los meses de diciembre a mayo. La temperatura media diaria oscila entre los 25 y 29 °C, la media mensual es alrededor de 26,4 °C con una media máxima absoluta de 38 °C y con una mínima de 21 °C.

Se presentan geoformas comunes en zonas de piedemontes, constituidas por depósitos aluviales del cuaternario en cursos fluviales provenientes de las montañas, con algunos vestigios de acumulaciones antiguos en ciertos sectores vecinos, terrazas y depósitos piedemontinos. Además se ubican meandros estrangulados, originados por una crecida repentina (avulsión), que actúa como factor desencadenante del cambio de pendiente en zonas de inundación.

Resaltan algunos movimientos de masa, facetas triangulares-trapezoidales y desprendimientos, los cuales suman evidencias al trazado de la falla que atraviesa la ciudad de

Guanare. La capa superficial está integrada por materiales finos (limos y arcillas) creando una capa impermeable a nivel superficial sometiendo dicha zona a un difícil efecto de infiltración, haciéndose estos más gruesos a medida que se acercan al piedemonte. En las Formaciones Río Guache, Parángula y Río Yuca predominan materiales como arenas gruesas y conglomerados de grano grueso con presencia de arcilla, mientras que la formación Guanapa la componen materiales como cantos, arenas y limos.

3 Metodología empleada

Las etapas metodológicas de la investigación se dividen en tres fases:

3.1. Etapa de pre-campo.

3.1.1 Recopilación de la información bibliográfica y la data hidrogeológicas.

Se realiza la consulta de trabajos de pregrado e informes realizados en años anteriores en la zona de estudio, de igual manera se recolecta información básica referente a datos hidrológicos, geología, fisiografía e información hidrogeológica, de los pozos profundos existen, tales como: coordenadas, cotas, niveles estáticos, piezométricos, caudal, profundidad de perforación, diámetro de la tubería, aprovechamiento, entre otros.

3.2. Etapa de campo

Durante esta fase, se realizan visitas a empresas y organismos encargados del control, supervisión y mantenimiento de los pozos públicos urbanos, con el objeto de recopilar información técnica disponible tanto verbal como documental con el fin de facilitar la localización exacta de los pozos, como también, datos adquiridos a través de registros eléctricos o perfiles litológicos suministrados por medio de las perforaciones al momento de su construcción. En la inspección efectuada a los pozos, detallada en las (figura 2a, 2b, 2c y 2d), se elaboró un filtro de los mismos en la cual se eliminó información doble corrigiendo problemas de nomenclatura, se originó data hidrogeológica nueva directamente tomada en campo, para finalmente generar el inventario, que servirá de base en esta investigación.

3.3. Etapa de post-campo

3.3.1 Procesamiento de la información recopilada

3.3.1.1 Perfiles Litológicos

La data de pozos recabada, arrojó un total de 74 pozos localizados dentro del área de estudio, de acuerdo a la litología obtenida y recopilada en las etapas anteriores, se elaboraron 13 perfiles litológicos, mapeada en la figura 3a, con

el propósito de observar la secuencia estratigráfica y lograr conocer, la composición granulométrica del suelo. (Figura 3b).



Fig. 2a.

Fig. 2b.

Fig. 2 Aspecto general de la estación en donde se encuentra el Pozo PP-30-06, perteneciente al organismo Hidroportuguesa, ubicado en el sector los Canales.



Fig. 2c. Fig. 2d.

Fig. 2c. Condiciones que se encuentran el pozo PP-30-31, ubicado en el barrio 12 de Octubre. Fig. 2d. pozo PP-30-21 ubicado en el barrio Los Malabares.

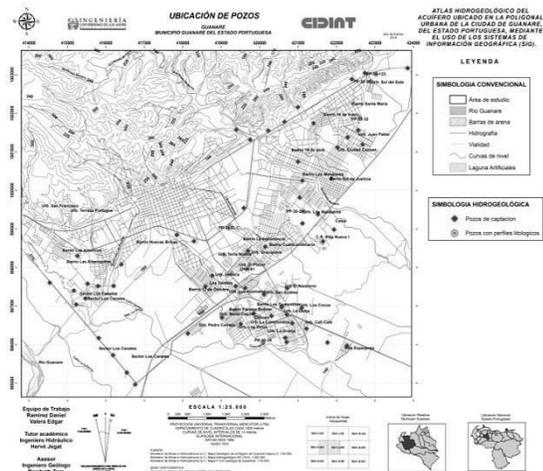


Fig. 3a. Localización de pozos en el área de estudio.

Dichos perfiles fueron generados con software de diseño CAD.

3.3.1.2 Secciones estratigráficas

La figura 4a muestra el desarrollo de secciones estratigráficas de acuerdo a los pozos que posee información litológica, para lograr una interpretación sedimentológica sobre el comportamiento lateral estratigráfico de los cuerpos (fi-

gura4b), con el propósito de abarcar la mayor extensión posible, a pesar el limitado número de columnas disponibles.

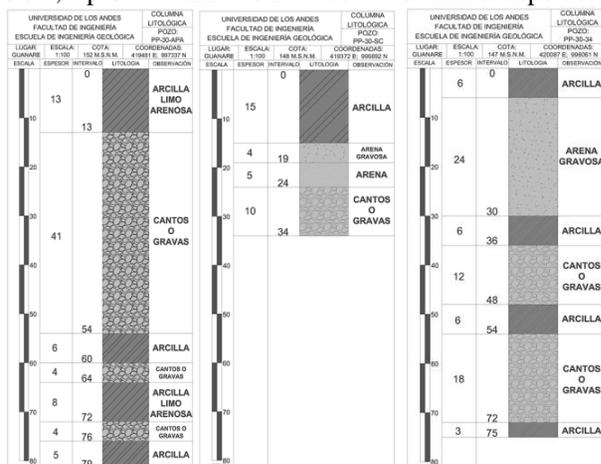


Fig. 3b. Perfiles de pozos en el área de estudio.

(CapINF1) y la altura de la capa superior del segundo acuífero respecto al nivel del mar en metros (CapINF2).

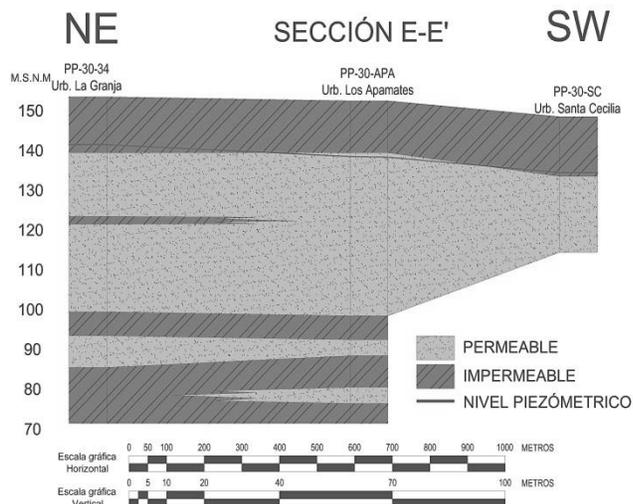


Fig. 4b. Sección estratigráfica.

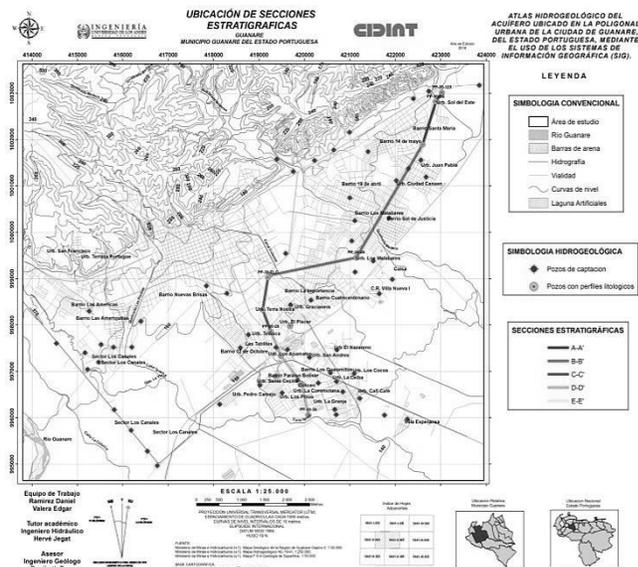


Fig. 4a. Secciones estratigráficas, a partir de la información litológica obtenida.

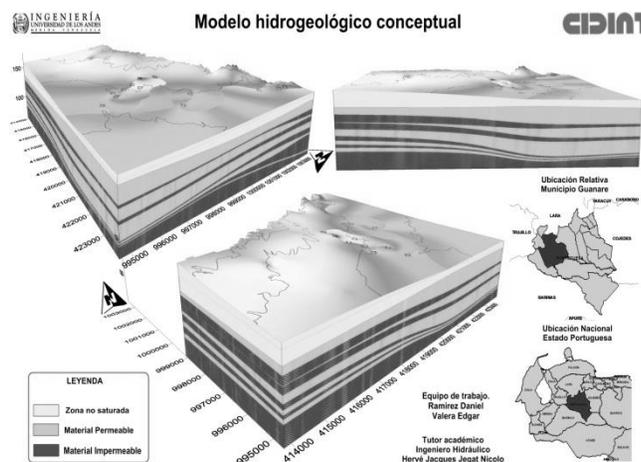


Fig. 5. Modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio.

3.3.1.3 Modelo hidrogeológico conceptual

Esta etapa se basa en la realización del modelo hidrogeológico tridimensional del área de estudio (figura 5), en el cual, los datos utilizados son los perfiles litológicos existentes, permitiendo la creación de las diferentes capas e isóneas, así como también del gráfico tridimensional. Las características de cada una de las capas que conforman el acuífero y sus respectivos valores son los siguientes: coordenada Este y Norte de cada uno de los pozos, altitud, CapSUP 1, es la altura de la capa superior del primer acuífero respecto al nivel del mar en metros, la altura de la capa inferior del primer acuífero respecto al nivel del mar en metros

3.3.1.4 Cálculo de recargas del acuífero

3.3.1.4.1 Recarga natural o por precipitación

La determinación de la recarga natural, o infiltración, se hace a través de un balance hídrico que consiste en la sumatoria algebraica de los aportes que pueden mantener el volumen de reservas. Esto aplica para la Ec. (1) siguiente como:

$$I = P - ETR - ESC \quad (1)$$

Donde:

$I =$ Infiltración (mm/año)
 $P =$ Precipitación (mm/año)

ETR = Evapotranspiración real(mm/año)
 ESC = Escorrentía (mm)

$$I = \sum i$$

Tabla 1. Balance hídrico de la estación Guanare-Aeropuerto.

Estación: Guanare-Aeropuerto		Letitud: 09°01'40" N												Datum: La Canoa		
Periodo: 1970-2008		Longitud: 69°44'40" W												Altitud: 163 m.s.n.m.	coeficiente 'a': 0,920397	Sumatoria
codig	Estado: Portuguesa	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	mm °C/año		
o2299	Precipitación Anual mm	11,7	18,1	34,4	126,7	222,0	260,7	264,7	209,3	173,2	176,6	100,8	31,3	1620		
Cálculo del ETP Método de Thornthwaite	Temperatura Media °C	26,0	27,1	28,0	27,4	26,4	25,3	24,9	25,2	25,0	26,0	26,1	26,5	26,2		
	Índice Calórico	12,15	12,89	13,55	13,12	12,40	11,66	11,37	11,57	11,46	12,16	12,21	12,46	146,99		
	ETP Sin Corregir	2,71	2,81	2,89	2,84	2,74	2,64	2,60	2,63	2,61	2,71	2,71	2,75			
	Número Max de horas de sol	11,6	11,7	11,9	12,2	12,4	12,5	12,4	12,3	12	11,8	11,6	11,5			
	Número de días del mes	30	31	30	31	30	31	30	31	30	31	30	31			
ETP Corregida	78,49	87,63	86,03	92,37	84,97	88,10	80,57	86,25	78,35	85,28	78,71	84,38	1011,1			
ETP Real	11,7	18,1	34,4	92,37	84,97	88,10	80,57	86,25	78,35	85,28	78,71	31,3	770,2			
Escorrentía (mm/mes)	90,72	90,72	90,72	90,72	90,72	90,72	90,72	90,72	90,72	90,72	90,72	90,72	90,72			
Infiltración (BHC)	0,00	0,00	0,00	0,00	46,29	81,89	83,41	32,29	4,17	0,65	0,00	0,00	248,7			

Precipitación

Los datos de precipitaciones se obtuvieron de quince estaciones meteorológicas dentro y adyacentes al área de estudio, abarcando entre los años 1959 hasta el 2008 en promedio, para este caso se efectuó en la estación Guanare-Aeropuerto, la figura 6 se detalla la variación pluviométrica del área con relación a la tabla 1, donde se determina el balance hídrico para la estación anteriormente señalada, la posible infiltración.

Se calcula la ETP mensual "sin corregir" mediante la fórmula:

$$ETP_{sin\ corregir} = 1,6 \left(\frac{10 \cdot t}{I} \right)^a \quad (3)$$

Donde:

ETP sin corregir = ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol (Teóricas).

t = temperatura media mensual, °C

I = índice de calor anual, obtenido en el punto 2°

$$a = (675 \times 10^{-9}) (I^3) - (771 \times 10^{-7}) (I^2) + (1792 \times 10^{-5}) (I) + 0,49239$$

Corrección para el n° de días del mes y el n° de horas de sol:

$$ETP = ETP_{sin\ corregir} \cdot \frac{N}{12} \cdot \frac{d}{30} \cdot d \quad (4)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial corregida

N = número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud (Tabla 2).

d = número de días del mes.

Para obtener la evapotranspiración real (ETR) se aplica las siguientes consideraciones:



Escorrentía

Para obtener los valores medios de escurrimientos se utiliza el mapa de isóneas de escurrimiento desarrollado por el CIDIAT, en él se muestra la zonificación a partir de los caudales de escurrimiento en diferentes intervalos. (figura 7).

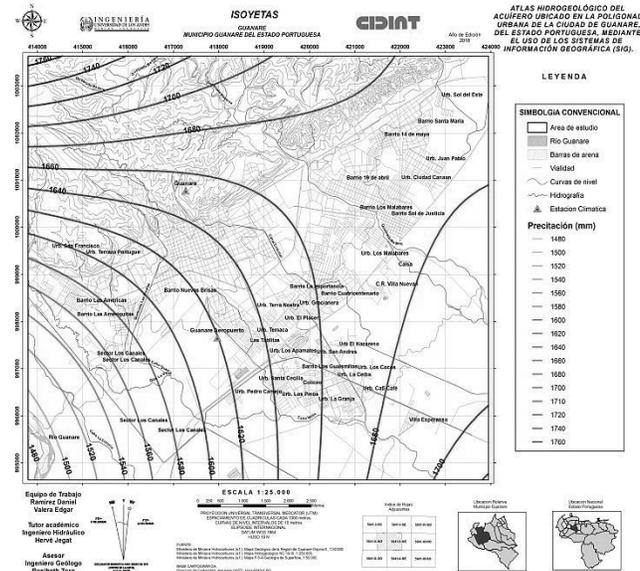


Fig. 6. Valores de precipitación anuales del área.

Evapotranspiración

El cálculo de la ETP se hizo mediante la aplicación del método de Thornthwaite, el cual determina el índice de calor mensual a partir de la temperatura media mensual vista en la Ec. (2). Posteriormente en la Ec. 3 se calcula el ETP sin corregir, finalmente este valor es corregido (ETP corregida) con la multiplicación de número de días del mes, el número de horas de sol y acuerdo a la latitud en que se encuentre la zona en estudio, en este caso 8°, Ec. (4).

Se calcula un "índice de calor mensual" (i) a partir de la temperatura media mensual:

$$i = \left(\frac{t(^{\circ}C)}{5} \right)^{1,514} \quad (2)$$

Se calcula el "índice de calor anual (I) sumando los 12 valores de i:

Tabla 2. Valores de N° horas de Sol, según la latitud.

Hemisferio Norte												Lat.	Hemisferio Sur												
Enc.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Grat.	Enc.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
0.6	1.6	11.0	15.6	21.3	24.0	24.0	21.3	15.6	11.0	6.4	2.3	0.9	70	18.9	12.8	12.0	11.4	10.8	10.2	9.6	9.0	8.4	7.8	7.2	6.6
1.1	7.3	11.1	15.3	19.7	24.0	22.3	17.0	12.7	8.7	4.1	0.0	68	21.9	16.7	12.9	8.7	4.3	0.8	1.7	7.0	11.3	15.6	19.9	24.0	
3.9	7.8	11.2	14.9	18.7	22.0	20.3	16.0	12.7	9.0	5.2	1.9	66	20.1	16.2	12.8	9.1	5.3	2.0	3.7	7.0	11.3	15.6	19.9	24.0	
5.8	8.2	11.2	14.2	17.9	20.3	19.2	16.0	12.6	9.1	6.0	3.7	64	19.0	15.8	12.8	9.3	6.1	3.7	4.8	8.0	11.4	14.7	18.0	21.3	
5.7	8.5	11.3	14.4	17.3	19.2	18.4	15.7	12.6	9.5	6.6	4.8	62	18.3	15.5	12.7	9.6	6.7	4.8	5.6	8.3	11.4	14.5	17.4	19.2	
4.4	8.8	11.4	14.2	16.8	18.4	17.7	15.3	12.5	9.7	7.1	5.6	60	17.6	15.2	12.6	9.8	7.2	5.6	6.3	8.7	11.5	14.3	16.9	18.4	
6.9	9.1	11.4	14.1	16.4	17.8	17.2	15.1	12.5	9.9	7.5	6.2	58	17.1	14.9	12.6	9.9	7.6	6.2	6.8	8.9	11.5	14.1	16.5	17.8	
7.2	9.3	11.5	13.9	16.0	17.3	16.8	14.8	12.4	10.1	7.9	6.7	56	16.7	14.7	12.5	10.1	8.0	6.7	7.2	9.2	11.6	13.9	16.1	17.3	
7.7	9.5	11.5	13.8	15.7	16.8	16.4	14.6	12.4	10.2	8.2	7.1	54	16.3	14.5	12.5	10.2	8.3	7.2	7.6	9.4	11.6	13.8	15.8	16.9	
8.0	9.7	11.5	13.6	15.4	16.5	16.0	14.4	12.4	10.3	8.5	7.5	52	16.0	14.3	12.5	10.4	8.4	7.5	8.0	9.6	11.6	13.7	15.5	16.5	
8.3	9.8	11.6	13.5	15.2	16.1	15.7	14.3	12.3	10.4	8.7	7.9	50	15.7	14.2	12.4	10.5	8.8	7.9	8.3	9.7	11.7	13.6	15.3	16.1	
8.4	10.0	11.6	13.4	15.0	15.8	15.5	14.1	12.3	10.6	9.0	8.2	48	15.4	14.0	12.4	10.6	9.0	8.2	8.5	9.9	11.7	13.4	15.0	15.8	
8.4	10.1	11.6	13.3	14.8	15.5	15.2	14.0	12.3	10.7	9.2	8.5	46	15.2	13.9	12.4	10.7	9.2	8.5	8.8	10.0	11.7	13.3	14.8	15.5	
9.1	10.3	11.6	13.2	14.6	15.3	15.0	13.8	12.3	10.7	9.4	8.7	44	14.9	13.7	12.4	10.8	9.4	8.7	9.0	10.2	11.7	13.2	14.6	15.3	
9.3	10.4	11.7	13.0	14.4	15.0	14.8	13.7	12.3	10.8	9.6	9.0	42	14.7	13.6	12.3	10.9	9.6	9.0	9.2	10.3	11.7	13.2	14.4	15.0	
9.5	10.5	11.7	13.1	14.2	14.8	14.6	13.6	12.2	10.9	9.7	9.2	40	14.5	13.5	12.3	10.9	9.8	9.2	9.4	10.4	11.8	13.1	14.3	14.8	
9.6	10.6	11.7	13.0	14.1	14.4	14.4	13.5	12.2	11.0	9.9	9.4	38	14.4	13.4	12.3	11.0	9.9	9.4	9.6	10.5	11.8	13.0	14.1	14.6	
9.8	10.7	11.9	13.0	14.4	14.2	14.4	13.4	12.2	11.1	10.1	9.6	36	14.2	13.3	12.3	11.1	10.1	9.6	9.8	10.6	11.8	12.9	13.9	14.4	
10.0	10.8	11.8	12.9	13.8	14.3	14.1	13.1	12.2	11.1	10.2	9.7	34	14.0	13.2	12.2	11.1	10.2	9.7	9.9	10.7	11.8	12.9	13.8	14.3	
10.1	10.9	11.8	12.8	13.6	14.1	13.9	13.2	12.2	11.2	10.3	9.9	32	13.9	13.1	12.2	11.2	10.4	9.9	10.1	10.8	11.8	12.8	13.7	14.1	
10.3	11.0	11.8	12.7	13.5	13.9	13.8	13.1	12.2	11.3	10.5	10.1	30	13.7	13.0	12.2	11.3	10.5	10.1	10.2	10.9	11.8	12.7	13.5	13.9	
10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8	13.8	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	28	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8	
10.5	11.1	11.8	12.6	13.3	13.6	13.5	12.9	12.1	11.4	10.7	10.4	26	13.5	12.9	12.2	11.4	10.7	10.4	10.5	11.1	11.9	12.6	13.3	13.6	
10.7	11.2	11.8	12.6	13.2	13.5	13.4	12.8	12.1	11.4	10.8	10.5	24	13.3	12.8	12.2	11.4	10.8	10.5	10.7	11.2	11.9	12.6	13.2	13.5	
10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.3	13.2	12.8	12.1	11.5	10.9	10.7	22	13.2	12.7	12.1	11.5	10.9	10.7	10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.3	
10.9	11.3	11.9	12.5	13.0	13.2	13.1	12.7	12.1	11.5	11.0	10.8	20	13.1	12.7	12.1	11.5	11.1	10.8	10.9	11.3	11.9	12.5	13.0	13.2	
11.0	11.4	11.9	12.4	12.8	13.1	13.0	12.6	12.1	11.6	11.1	10.9	18	13.0	12.6	12.1	11.6	11.2	11.0	11.0	11.4	11.9	12.4	12.9	13.1	
11.1	11.5	11.9	12.4	12.7	12.9	12.9	12.5	12.1	11.6	11.2	11.1	16	12.9	12.5	12.1	11.6	11.3	11.1	11.1	11.5	11.9	12.4	12.8	12.9	
11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	14	12.7	12.4	12.1	11.7	11.4	11.2	11.2	11.5	11.9	12.3	12.7	12.8	
11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	12	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	
11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	12.5	12.3	12.0	11.8	11.6	11.6	10	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	
11.6	11.7	11.9	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12.0	11.8	11.6	11.5	8	12.4	12.3	12.1	11.8	11.6	11.5	11.6	11.7	12.0	12.2	12.4	12.5	
11.7	11.8	12.0	12.3	12.3	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	11.7	6	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3	12.3	
11.8	11.8	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	4	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	11.9	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2	
11.9	11.9	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	2	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	
12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	

mogeneidad en la permeabilidad en las adyacencias del río. Se realizó mediante la aplicación de la fórmula de Darcy, Ec. (4), de la siguiente manera:

$$\text{Recarga (caudal)} = Q = K \cdot I \cdot A \tag{4}$$

Donde:

K = Permeabilidad = 156,25 (m/día)

I = Gradiente hidráulico = 0.0035

A = Área de paso (m²) = 42.377,93 m²

La Ec. 5 expresa el cálculo de gradiente hidráulico, se tomavalores de lapiezometría mostrado en la figura 8.

$$I = \frac{(H_1 - H_2)}{L} \tag{5}$$

Donde:

I = Gradiente hidráulico

H₁ = Nivel piezométrico en la parte superior (m)

H₂ = Nivel piezométrico en la parte inferior (m)

L = Distancia entre los dos puntos H₁ y H₂ (m)

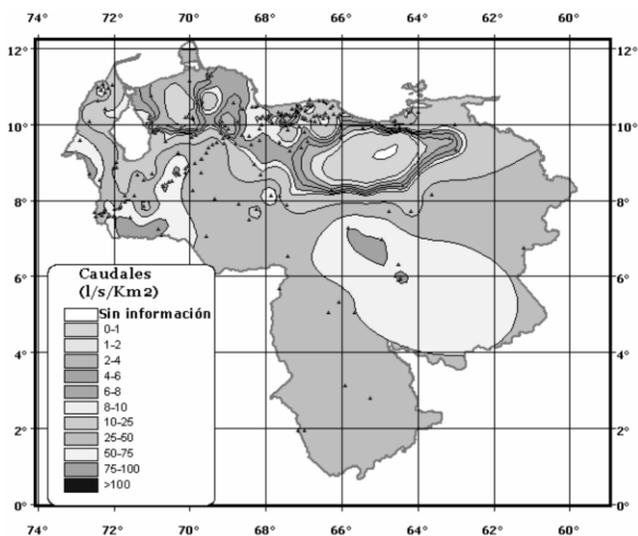


Fig. 7. Mapa de Isolíneas de escurrimiento. Fuente: CIDIAT.

Infiltración

Las aguas subterráneas se derivan de una parte de los volúmenes que se infiltran. El cálculo de la infiltración se realiza tomando los valores obtenidos con anterioridad de la precipitación, la evapotranspiración real y la escorrentía, aplicando la ecuación 1.

$$I = P - ETR - ESC \tag{1}$$

La recarga por precipitación anual es igual:

$$\text{recarga} = 1620 \frac{\text{mm}}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ metros}}{1000 \text{ mm}} \times \frac{65.000.000 \text{ m}^2}{1}$$

$$\text{recarga} = 105 \times 10^6 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

3.3.1.4.2 Recarga del río Guanare

Para el cálculo de la recarga, se tomó en cuenta la ho-

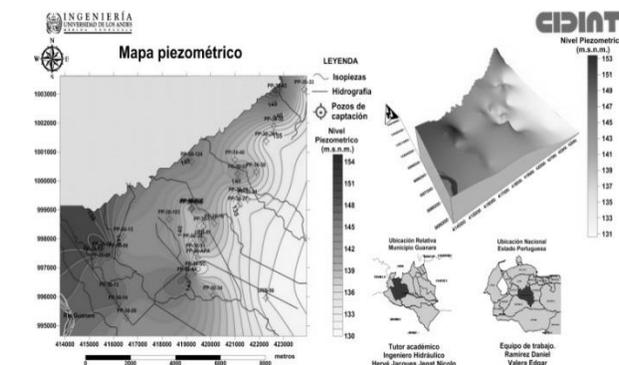


Fig. 8. Mapapiezométrico de la zona de estudio.

Posteriormente se efectúa el cálculo del área de paso empleando la Ec. 6, dada por la siguiente expresión:

$$A = L * Se \tag{6}$$

$$A = 1.324,31 \text{ m} * 32 \text{ m} = 42.377,93 \text{ m}^2$$

Donde:

L= Longitud del río

Se = Valor de espesor saturado mostrado en la figura 9.

Se tiene entonces el siguiente resultado:

$$Q = 156,25 \text{ (m/día)} * 0.0035 * 42.377,93 \text{ m}^2 * 365$$

$$Q = 8.459.032,12 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$Q = 8.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

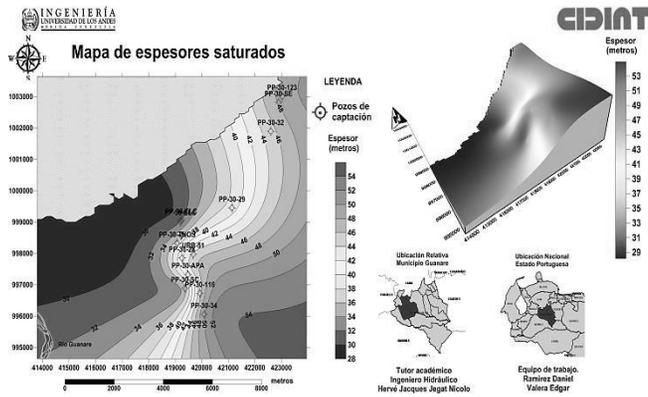


Fig. 9. Mapa de espesores, recarga por el río Guanare.

3.3.1.4.3 Recarga del piedemonte andino

En la Ec. 4, se aplica nuevamente la fórmula de Darcy, tomando en cuenta una transmisividad promedio de 3000 m²/día, presentado en la figura 10, y el valor de la longitud de 1143,5 metros en la ecuación señalada anteriormente, asimismo la figura 11 muestra la dirección de flujo o de movimiento aparente del agua procedente de topografía más elevada.

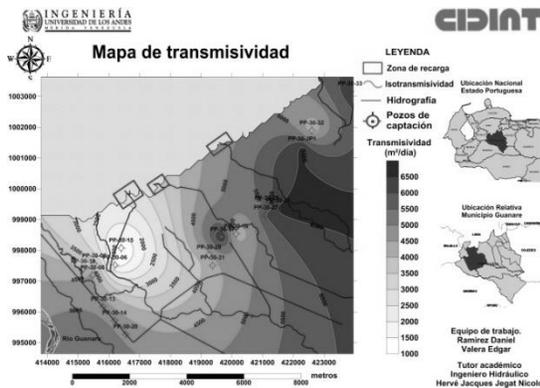


Fig. 10. Mapa de transmisividad, recarga por el piedemonte.

$$\text{Recarga (caudal)} = Q = K \cdot I \cdot A \quad (4)$$

Donde:

- K = Transmisividad promedio de la zona= 3000 (m²/día)
- I = Gradiente hidráulico = 0,0035
- A = Ancho de la franja a lo largo de una carga hidráulica = 1143,5 m

Se tiene entonces el siguiente resultado:

$$Q = 3000 \text{ (m}^2\text{/día)} * 0.0035 * 1143,5 \text{ (m)} * 365 \text{ (día/año)}$$

$$Q = 4.380.547,7 \text{ m}^3\text{/año.}$$

$$Q = 4 \times 10^6 \text{ m}^3\text{/año.}$$

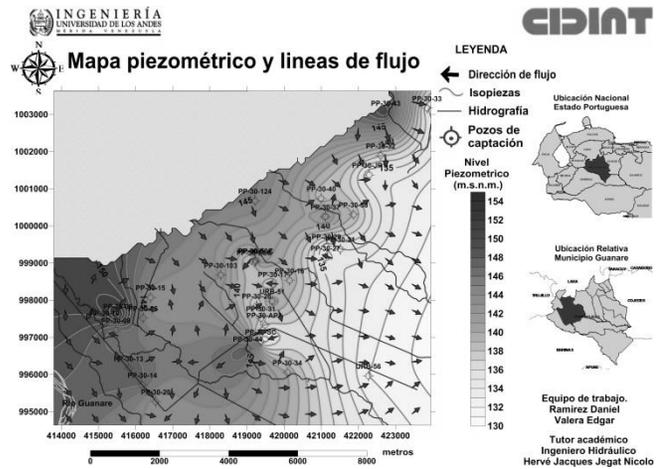


Fig. 10. Mapa piezométrico y líneas de flujo.

3.3.1.5 Cálculo de las reservas de agua subterránea

Las reservas se calculan una vez obtenido el modelo hidrogeológico conceptual, a partir de las capas permeables generadas, contenidas en las zonas saturadas, donde se alcanza un volumen total, para posteriormente mediante una fórmula, calcular dichas reservas de agua en el suelo. El cálculo del volumen total de roca permeable en el acuífero se llevó a cabo a través del software, el cual permite realizar el cálculo de volúmenes existentes entre capas. (Figura 10)

Volumen	
Z Scale Factor:	1
Total Volumes by:	
Trapezoidal Rule:	1347584482.3058
Simpson's Rule:	1347593461.8044
Simpson's 3/8 Rule:	1347588940.6454
Cut & Fill Volumes	
Positive Volume [Cut]:	1347582057.8283
Negative Volume [Fill]:	0
Net Volume [Cut-Fill]:	1347582057.8283

Fig. 10. Reporte del software del volumen calculado para capa permeable.

El volumen total de capas permeables, corresponde al “Net Volumen [Cut-Fill]” el valor numérico esta en metros cúbicos (m³), el volumen total va a ser la sumatoria de todos los volúmenes netos suministrados por todos los reportes, esto dependerá de cuantas capas permeables se generaron en el modelo hidrogeológico.

Finalmente la reserva permanente (VRP) se obtiene, multiplicando la Ec. 7, el volumen permeable total saturado (VPTS) por la porosidad efectiva (ϕ_{ef}) del material que constituye el acuífero (Tabla 3). En este caso, el material presenta una porosidad efectiva de 20% valor que se tomó para estimar las reservas en la zona estudiada.

$$VRP = VPTS * \phi_{ef} \quad (7)$$

Tabla 3. Porosidades totales y eficaces de diversos materiales según Johnson (1967), Schoeller (1962) y Ward (1967).

Material		Porosidad Total (%)			Porosidad Eficaz (%)		
Tipo	Descripción	med	máx	min	med	máx	min
Rocas Masivas	Granito	0,3	4	0,2	< 0,2	0,5	0
	Caliza	8	15	0,5	< 0,5	1	0
	Dolomia	5	10	2	< 0,5	1	0
	Arenisca	15	25	3	10	20	0
Rocas metamórficas		0,5	5	0,2	< 0,5	2	0
Rocas volcánicas	Piroclastos y tobos	30	50	10	<5	20	0
	Escorias	25	80	10	20	50	1
	Pumitas	85	90	50	< 5	20	0
	Basaltos densos, fonolitas	2	5	0,1	<1	2	0,1
	Basaltos vacuolares	12	30	5	5	10	1
Rocas sedimentarias sueltas	Aluviones	25	40	20	20	35	5
	Dunas	35	40	30	25	30	10
	Gravas	30	40	25	20	35	10
	Loess	45	55	40	<5	10	0,1
	Arenas	35	45	20	25	35	10
	Depósitos glaciares	25	35	15	15	30	5
	Limos	40	50	35	10	20	2
	Arcillas sin compactar	45	60	40	2	10	0
	Suelos superiores	50	60	30	10	20	1

4 Análisis de resultados

4.1 Perfiles litológicos.

La información litológica que se posee de los pozos proviene de datos adquiridos a través de registros eléctricos o en su gran mayoría fueron suministrados por medio de las perforaciones al momento de su construcción, teniendo en cuenta que dichos datos poseen gran variabilidad, es decir, algunos presentan información detallada y otros descripciones muy generales, esto probablemente sucede debido al empleo de criterios subjetivos, que varían según el nivel de conocimiento del personal que cada empresa posee a cargo para describir y analizar los datos al momento de la perforación o en estudios previos de sondeos realizados a cada pozo. Para solucionar la gran variabilidad mostrada entre la información litológica, fue necesario refinar con detenimiento cada una de las columnas estratigráficas, con el propósito de conservar un patrón granulométrico en secuencia vertical de las capas para facilitar su manejo en la construcción de las secciones estratigráficas. Generalmente presentan materiales gruesos que varían de conglomerados de gravas a gravas con cantos y arenas localizándose allí las capas permeables, mientras que las capas impermeables están representadas por limos y arcillas plásticas.

4.2 Secciones estratigráficas

La mayoría de las secciones presentan las mismas características del subsuelo, a grosso modo consta de la intercalación de cinco (5) capas tanto permeables (arenas y gravas) como impermeables (limos y arcilla), encontrando la

primera de ella en espesores de mayor magnitud, aunque en ocasiones tienden a acunarse, el nivel estático está dentro de los 15 metros aproximadamente debajo de la superficie, la distancia promedio está entre las secciones varía entre 600 y 1950 metros de longitud.

4.3 Recargas del acuífero

4.3.1 Natural o por precipitación

La infiltración ocurre con mayor relevancia entre los meses de mayo a octubre, caso contrario que no ocurre de noviembre a abril, donde la tasa de evapotranspiración es alta, impidiendo que dicho ciclo se desarrolle con normalidad, adicionalmente a pesar de ser la principal fuente de recarga, en ocasiones pueda estar interrumpida por varios factores, uno de ellos radica en la presencia de capas permeables en las formaciones geológicas superiores, de todos modos se obtiene una recarga anual de $105 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, para una área de 65 km^2 .

4.3.2 Por el río Guanare

Son pocas las fórmulas diseñadas para estimar la recarga real. Las fórmulas están usualmente basadas en observaciones prolongadas de caudal del río dentro de una región, y en general no son válidas para caudales de los ríos en otras regiones con diferentes condiciones de campo. Por ello se aplicó la estimación de la recarga con la técnica de Darcy, en el cual arrojó un caudal de $Q = 8,4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$.

4.3.3 Por el pie de monte

El pie de monte se ubica entre el sector pre andino y la planicie, las recargas por este medio se originan, a través de las quebradas de Las Piedras y El Medero, las cuales provienen de las altas montañas hasta las zonas más llanas, del mismo modo se debe destacar la concurrencia de las líneas de flujo del mapa piezométrico con la trayectoria o dirección de recarga que genera dicha geomorfología. Produciendo un caudal de $4.380.547,7$ o $4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$.

4.4 Reservas de aguas subterráneas

Se obtuvieron cinco (5) capas permeables, mediante los sistemas de información geográficos, arrojando las siguientes cifras:

El volumen de reserva permanente total calculado, corresponde a las capas permeables, éstas están constituidas por un material litológico de aluvión reciente, el cual tiene una porosidad eficaz de 20% (según Johnson 1967), dicha porosidad incluye todas las partículas que las conforman y el espacio por el que circula el agua.

$$\text{Volumen Reserva Permanente} = 2.101.536.952,92 \text{ m}^3 \times 0,20$$

$$\text{Volumen Reserva Permanente} = 420.307.390,4 \text{ m}^3$$

Volumen Reserva Permanente = $420 \times 10^6 \text{ m}^3$

Tabla 5. Volúmenes de las capas impermeables.

Capas	Volumen permeable saturado (m^3)
Capa 2 Superior - Inferior	591.393.253,91
Capa 4 Superior – Inferior	379.337.901,85
Capa 6 Superior – Inferior	566.250.959,32
Capa 8 Superior – Inferior	328.528.282,52
Capa 10 Superior - Inferior	236.026.554,32
Total volumen	2.101.536.952,92

5 Conclusiones

La geología juega un papel de gran importancia en el acuífero, para la recarga, circulación y almacenamiento del vital líquido, originado en las planicie aluviales donde se encuentran material litológico permeables con excelentes parámetros hidrogeológicas, como son las gravas, conglomerados y arenas.

En el subsuelo se perciben espesores de sedimentos intercalados entre arcillas, arenas y gravas, teniendo en algunos casos continuidad lateral y en otros no, predominando el material permeable en toda la zona; del mismo modo este posee características potenciales por excelencia para el resguardo o almacenamiento del agua subterránea.

Las secciones estratigráficas elaboradas con la ayuda de los perfiles litológicos arrojaron una profundidad máxima del subsuelo de 150 metros, en donde la capa superior existente posee material impermeable a lo largo de todo el área, lo cual constituye una barrera de protección ante los agentes contaminantes de la superficie, aunado a esto en algunos lugares presenta espesores mínimos y poco impermeables, presumiendo que son sitios ideales para la infiltración en el proceso de recarga por precipitación.

La mayor recarga se genera por la precipitación o recarga natural, filtrándose en el suelo, e ingresando al acuífero un total aproximado de $105 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$. Con respecto al aporte proveniente del piedemonte y del río, estos son menores, pues exhiben valores de $4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ y $8,4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ respectivamente

El acuífero del área según sus características hidráulicas y estructurales posee un comportamiento libre, este localizado en el estrato superior permeable, integrado por material arenoso y gravoso, a medida que profundizamos cambia a un comportamiento confinante, variando el comportamiento de un pozo a otro dentro de una distancia menor a 1000 metros.

Referencias

- Aparicio J, 1992, Fundamentos de Hidrología de Superficie, Limusa, México.
- Custodio E, Llamas M, 1976, Hidrología subterránea, Ediciones Omega, Barcelona, España.
- González de Vallejo L, 2004, Ingeniería Geológica, Pearson Educación, Madrid, España.
- Mora A, Rivas K, 2015, Elaboración del atlas hidrogeológico del acuífero ubicado en el casco central de la ciudad de Barinas, Venezuela, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Mora J, 2006, Evaluación del acuífero comprendido entre los Ríos Masparro y Boconó en el estado Barinas, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Reyes E, Quezada G, 2002, Operación y mantenimiento de sistemas de agua potable, Universidad Cuenca, Ecuador.
- Rodríguez B, 2013, Lineamientos de gestión ambiental para el manejo de las aguas subterráneas, en la ciudad de Guanare, estado Portuguesa, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales “Ezequiel Zamora”, Guanare, Venezuela.
- Salas R, 2009, Evaluación de la Disponibilidad de Aguas Subterráneas del área Comprendida entre el río Santo Domingo, estado Barinas y el río Guanare, estado Portuguesa, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Su Ah Sor R, 2006, Evaluación de la cantidad y calidad del agua del acuífero de la ciudad de Guanare, CIDIAT, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Vivas D, 2007, Análisis de la Susceptibilidad a la Contaminación del Acuífero de la ciudad de Guanare, Edo. Portuguesa, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Ramírez, Daniel:** Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes.
- Valera, Edgar:** Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Correo electrónico: edgarvalerab@gmail.com
- Hervé, Jegat:** Ingeniero Hidráulico. Dr. Profesor e investigador del CIDIAT. Universidad de Los Andes. Correo electrónico: hjegat@ula.ve
- Molina, Germán:** Ingeniero Geólogo. Profesor de la Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Correo electrónico: ingermanmolina@gmail.com
- Rivas, Daniel:** Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Correo electrónico: erivasdaniel@gmail.com
- Meza, Hillary:** Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Correo electrónico: nahara_93@hotmail.com

Capítulo 92

Esfuerzo cedente en fluidos de perforación arcillosos en medio electrolítico: Una nueva descripción teórica.

Zambrano-Herrera, Werner¹; Sulbarán, Belky^{1,2,*}; Olivares-Rivas, Wilmer¹

¹ Grupo de Quimicofísica de Fluidos y Fenómenos Interfaciales (QUIFFIS), Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

² Universidad Politécnica Territorial del estado Mérida Kléber Ramírez, Mérida, Venezuela.

[*belkysulbaran@gmail.com](mailto:belkysulbaran@gmail.com)

Resumen

Durante las labores de perforación de un pozo, la resistencia al flujo o esfuerzo cedente τ_y del fluido de perforación permite evaluar su capacidad de remoción de los rípios o cortes provenientes de la perforación. En la literatura se correlaciona el esfuerzo cedente con la presión de hinchamiento (Π), en función de la fracción volumétrica ϕ , a través de la expresión empírica $\tau_y \propto b\phi^n \Pi(\phi)$, donde Π se calcula con la popular pero errónea teoría DLVO. En este trabajo mostramos que en realidad $\tau_y \approx \Pi$, cuando Π se calcula con modelos y teorías con sólidas bases Mecanico Estadísticas. La presión de hinchamiento se considera como el efecto total entre las contribuciones electrostáticas y las de corto alcance tipo van der Waals. Siendo la primera calculada a través de la ecuación integral HNC (HypernettedChain) según un modelo de placas planas a carga constante y espesor finito, alineadas paralelamente en un medio electrolítico de tamaño finito. Los valores obtenidos por simulación son comparados con datos experimentales de Π y τ reportados por otros investigadores para lodos arcillosos de montmorillonita y laponita. Se verificó la estrecha relación entre ambas propiedades y una buena concordancia al usar las teorías Derjaguin- HNC. En ciertas condiciones la aproximación MGC para la doble capa eléctrica es válida, pero la aproximación DLVO para la presión, comúnmente usada en la literatura, resultó siempre inadecuada y no se justifica su uso en campos de perforación.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

Las suspensiones de arcillas en agua o aceite, después de cierta fracción volumétrica de sólidos, comienzan a exhibir comportamiento no newtoniano del tipo *fluido viscoplástico* o *plástico de Bingham*. En estos casos, el material en reposo sólo se deforma y fluye viscosamente al aplicársele esfuerzos grandes. El punto de transición o umbral en el cual un material pasa de plástico a viscoso, τ_y , se conoce como “*tensión de resistencia al flujo*” o “*esfuerzo cedente*”, del inglés “*yield stress*”. Esta es una propiedad de interés industrial usada para evaluar la calidad de suspensiones comunes como pastas dentales, salsas de tomate o lodos de perforación. En este último caso, objeto de estudio de este trabajo, τ_y permite evaluar la capacidad de remoción de cortes provenientes de la perforación, comúnmente denominados “*rípios*”. En la literatura existe cierta polémica sobre su significado y los métodos para su medición experimental, siendo la preparación de la muestra, el modelo y la teoría para evaluarla los factores determinantes. Esto ha ocasionado dificultad para establecer claramente una ecuación matemática, bien fundamentada, que pueda describir o predecir los valores a diferentes condiciones de operación, por lo que sólo se han generado unas cuantas ecuaciones con fines únicamente de ajuste numérico paramétrico. Bajo esta premisa, el presente trabajo es un intento por alcanzar esta meta, dilucidando el origen mecánico estadístico del yield stress (τ_y) y, al mismo tiempo proponiendo una ecuación que enlaza la física del fenómeno a través de la presión de hinchamiento.

2 Marco Teórico

En términos de la Presión de Hinchamiento (Π), se calcula el Yield Stress (τ_y) de lodos de perforación arcilloso, en medio electrolítico y se comparan con resultados experimentales reportados por otros investigadores. Esto se lleva a cabo desde el punto de vista teórico por simulación de una suspensión acuosa de arcilla del tipo montmorillonita o laponita, típico lodo de perforación, en presencia de iones agregados o provenientes de la formación, según el modelo presentado en la Fig. 1. Éste se basa en descripciones como las de Sakairi (Sakairi y col., 2005) e imágenes de microscopía electrónica de investigaciones recientes de Jönsson (Jönsson y col., 2005). Este modelo permite la obtención de la presión de hinchamiento en arcillas considerándolas como placas planas, de tamaño real, apiladas paralelamente, extendiendo así el modelo clásico de dos placas aisladas, como se visualizan en la Fig. (1).

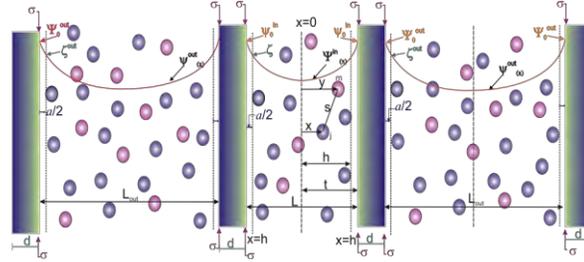


Fig. 1. Modelo de la interacción de placas de arcilla, para HNC y MGC. La carga σ es constante para cualquier valor de separación L . El espesor de las placas d es finito, del orden de 1 nm , y el diámetro iónico (a) es igual a 0.425 nm . L_{out} es del orden de $1000a$. El potencial $\psi_0 = \psi_0(L, \sigma)$ no es constante. La región entre 0 y h se denomina “*in*”, mientras que la zona para x entre $X_0 = L/2 + d + a/2$ y $L_{out}/2$ se denomina “*out*”.

En general, la presión de hinchamiento para una dada aproximación teórica se define como:

$$\Pi^{approx} = P_{el}^{approx}(L, a) + P_{vdW} \quad (1)$$

donde $P_{el}^{approx}(L, a)$ es la presión electrostática, calculada, según la fórmula de Olivares (Olivares y McQuarrie, 1979), representada como:

$$P_{el}^{approx}(L, a) = kT \left[\rho^{in} \left(\frac{a}{2} \right) - \rho^{out} \left(\frac{a}{2} \right) - \frac{1}{2\epsilon} \left[\int_0^h \rho_c^{in}(y; L) dy \right]^2 - \int_{x_0}^{\infty} \rho_c^{out}(y; L) dy \right]^2 \quad (2)$$

en este caso la aproximación utilizada se obtiene empleando los perfiles de densidad predichos por la teoría formal HNC, por lo que $P_{el}^{approx}(L, a) = P_{el}^{HNC}(L, a)$. Mientras que P_{vdW} es la presión debido a las fuerzas de van der Waals entre las placas, que puede escribirse como:

$$P_{vdW} = -\frac{A}{6\pi} \left(\frac{1}{L^3} + \frac{1}{(L+2d)^3} - \frac{2}{(L+d)^3} \right) \quad (3)$$

Para parámetros conocidos del material sólido, del fluido y de los electrolitos, las presiones de hinchamiento son calculadas por estas ecuaciones, a través del programa D-HNC-QUIFFIS, desarrollado en el Grupo QUIFFIS-ULA (Olivares y col., 1995, Lozada-Cassou y col., 1996). La simplificación de este modelo, despreciando la correlación ión-ión de corto alcance, conlleva a la aproximación MGC (GouyChapman Modificada). Pero, la sobre simplificación de reemplazar las placas finitas por bloques de espesor infinito, con muy bajas cargas superficiales y suponer iones puntuales a dilución infinita con perfiles superpuestos, conlleva a la tristemente famosa aproximación DLVO. En el caso particular de esa aproximación, la validez corresponde a las condiciones de ρ_{sal} muy bajo ($< 0.001M$), L y d muy grandes ($> 50nm$), σ muy baja ($< 0.01\text{ C/m}^2$) y ϕ bajo ($\ll 1$), y las ecuaciones anteriores se reducen a:

$$\Pi^{DLVO} = 64kT\rho_{sal} \left(\frac{\tanh \frac{\phi_0}{4}}{4} \right)^2 e^{-\kappa L} - \frac{A}{6\pi} \left(\frac{1}{L^3} \right) \quad (4)$$

$$\text{donde } \phi_0 = 2 \sinh^{-1} \left(\frac{ze\sigma}{2\kappa \epsilon kT} \right)$$

La distancia entre placas, L , es correlacionada con la concentración volumétrica de arcillas ϕ , asumiendo el arreglo mostrado en la Fig. (1)

$$\phi = \frac{V_{placa}}{V_{Total}} = \frac{d}{(d+L)} \quad (5)$$

En la literatura, la determinación del τ se hace a través de la correlación $\tau \propto b\phi^n\Pi(\phi)$. Aquí nosotros mostraremos que en realidad $\tau \cong \Pi(\phi)$.

3 Discusión y Resultados

Al calcular la presión de hinchamiento, para suspensiones de arcilla cuyas características se presentan en la Fig.(2), puede notarse como la teoría D-HNC (o-o) y D-MGC (-.-), Ecs. (2-3), se ajustan mejor a los resultados experimentales de Lubetkin (Lubetkin y col., 1984) hasta distancias tan bajas como 3 nm. Por su parte la teoría DLVO Ec. (4), falla al mostrar comportamiento opuesto al mismo en sistemas de baja separación entre placas, dando incluso presiones negativas.

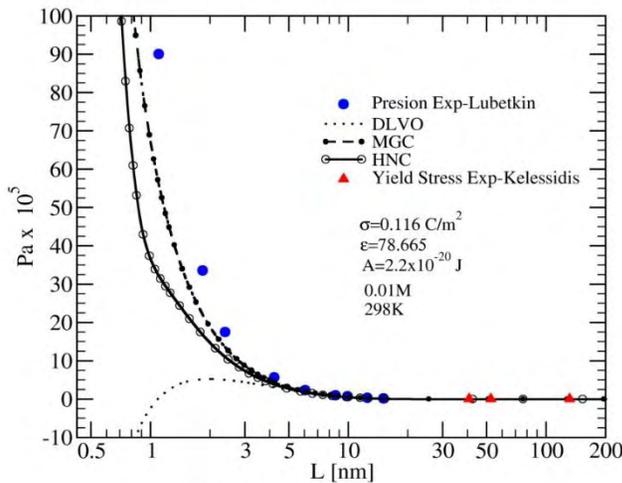


Fig. 2. Presión de hinchamiento Π de suspensiones de bentonita Wyoming en función de la separación nanométrica entre placas L . Los puntos son los valores experimentales.

Por otra parte, al correlacionar la presión de hinchamiento con el esfuerzo cedente de la forma $\tau = \Pi$, como se presenta en la Fig. (3), se evidencia una buena concordancia entre los datos calculados y los experimentales para suspensiones de laponita. Se muestran otras ecuaciones del tipo $\tau = \phi^n\Pi(\phi)$, con $n=1,2$, implementadas por otros investigadores (Pignon 1997, Laxtony col., 2006) y derivadas, no para suspensiones de arcillas planas, sino de partículas esféricas. Se puede ver que estas se alejan del comportamiento esperado.

Finalmente, el valor de la fracción de volumen ϕ utilizada es una aproximación válida sólo si todas las placas están alineadas y la separación lateral entre puntas es menor que la separación transversal entre planos, o sea

$L_y \ll L$, y $\phi = \phi_0 = \frac{1}{1+L/d}$. Un análisis geométrico de la

Fig.(1) sugiere la corrección

$$\phi = \frac{\phi_0}{1+L_y/d} \quad (6)$$

lo cual requiere que L_y sea un parámetro ajustable adicional. Esto se ilustra en la Fig. (4), donde se emplea como parámetro de ajuste el valor de $L_y = 0.58d$ y la curva negra con este factor se transforma en la verde, la cual predice perfectamente el comportamiento experimental del esfuerzo cedente, mientras que DLVO nuevamente da erróneamente valores negativos.

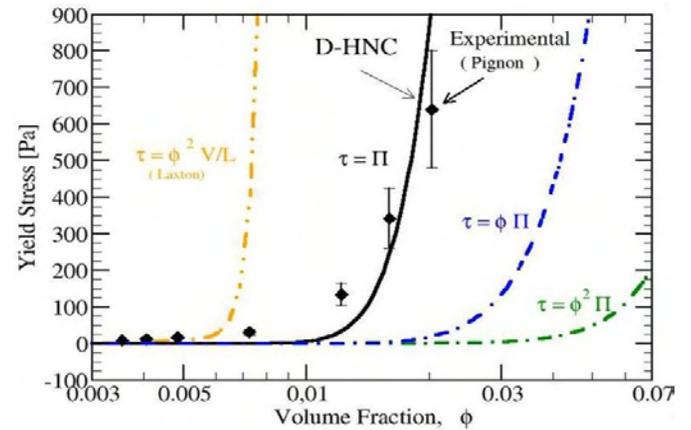


Fig. 3. Diferencias entre factores de proporcionalidad, ecuaciones propuestas para determinar el esfuerzo cedente τ con datos experimentales de suspensiones de laponita (Pignon F., 1997).

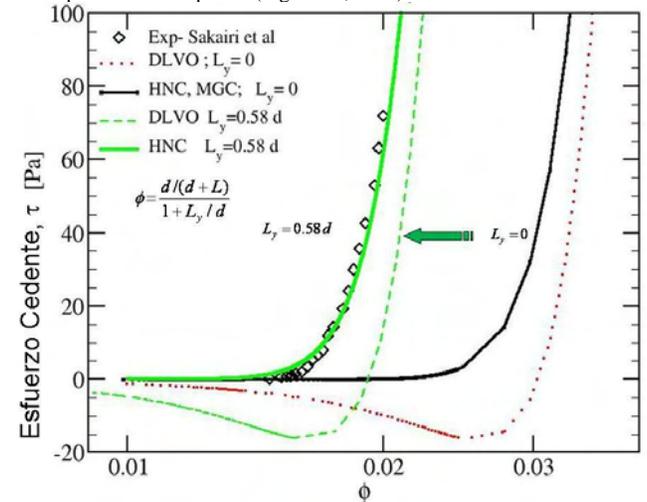


Fig. 4. Curvas teóricas y experimentales del esfuerzo cedente para suspensiones de Bentonita Kunipia-F de densidad de carga superficial 0.1057 C/m^2 [Sakairi, 2005] en solución de NaCl a 300K y 0.01M . Curvas teóricas con $\phi = \phi_0$ a la derecha y desplazada a la izquierda hacia la data, usando Ec. (6) con $L_y=0.58\text{nm}$.

4 Conclusiones

La ecuación que predice mejor comportamiento para el esfuerzo cedente o tensión de resistencia al flujo es la igualdad entre esta última y la presión de hinchamiento es decir: $\tau = \Pi^{approx}$. A pesar que no se consigue un fino ajuste cuantitativo, la adición de un factor geométrico L_y , que involucra el volumen entre puntas de un par de plaquetas de arcillas, muestra la perfecta correspondencia entre estos dos fenómenos correlacionados. La ecuación de DLVO no se recomienda para el cálculo de la presión y por ende para la tensión de resistencia al flujo τ .

Referencias

- Jönsson B, Åkesson T, Jönsson B, Meehdi S, Janiak J, Wallenberg R, 2009, Structure and forces in MX-80 Bentonite Theoretical Chemistry, Chemical Center, TR-09-06 SKB Report.
- Laxton PB, Berg JC, 2006, relating clay yield stress to colloidal parameters, Journal of Colloid and Interface Science, Volume 296, Issue 2, Pages 749–755.
- Lozada-Cassou M, Olivares-Rivas W, Sulbarán B, 1996, Violation of the local electroneutrality in pores at fixed surface charge, Physical Review E, Volume 53, Issue 1, Pages 552–530.
- Lubetkin S, Middleton R, Ottewill R, 1984, Some Properties of Clay–Water Dispersions [and Discussion], Philosophical Transactions of the Royal Society of London A, Volume 311, Issue 1517, Pages 353–368.
- Olivares W, McQuarrie D, 1979, Interaction between double layers, The Journal of Physical Chemistry, Volume 84, Issue 8, Pages 863–867.
- Olivares-Rivas W, Sulbarán B, Lozada-Cassou M, 1995, Static and transport properties of symmetric and asymmetric electrolytes in micropores at fixed surface potential, The Journal of Chemical Physics, Volume 103, Issue 18, Pages 8179–8188.
- Pignon F, Magnin A, Piau J, Cabane B, Linder P, Diat O, 1997, Yield stress Thixotropic clay suspension: Investigation of structure by light, neutrón and x-ray scattering, Physical Review E, Volume 56, Issue 3, Pages 3281–3289.
- Sakairi N, Kobayashi M, Adachi Y, 2005, Effects of salt concentration on the yield stress of sodium montmorillonite suspension, Journal of Colloid and Interface Science, Volume 283, Issue 1, Pages 245–250.

Zambrano-Herrera, Werner: *MSc. en Química Aplicada, Universidad de Los Andes, Ingeniero Químico de fluidos de perforación en Industria Petrolera venezolana. Correo electrónico: zwernerdavis@gmail.com*

Sulbarán, Belky: *Msc., Dr. en Química Aplicada, Universidad de Los Andes, Profesora Titular UPTM-KR.*

Olivares-Rivas, Wilmer: *MSc in Chemistry, Ph D en Chemical Physics, Indiana University, Profesor Titular (J) ULA. Correo electrónico: wilmer@ula.ve*

Capítulo 93

Esfuerzo control y supervisión de una placa térmica usando el controlador digital CONTROL-LAB

Ortega, Heyzel*; Córdor, Claudio; Quintero, Jormany

Escuela de Ingeniería de Sistemas. Universidad de Los Andes, Sector La Hechicera, Núcleo Pedro Rincón Gutiérrez, Edif. B. Nivel 3, Ala Sur, Dpto. Sistemas de Control, Mérida, Venezuela.

*heyzelcop@gmail.com

Resumen

Hoy en día es imprescindible el uso de Computadoras Digitales en el control de procesos, esto es debido a su bajo costo, eficiencia y versatilidad al momento de implementar algoritmos de control que van desde los más sencillos hasta los más complejos. Esta incorporación, en los procesos de control, ha permitido el desarrollo de herramientas computacionales para la supervisión en línea de los sistemas físicos. Motivados por la importancia y la ausencia de un controlador de este tipo, en la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Los Andes se desarrolló un controlador digital (CONTROL-LAB), que permite aplicar diferentes técnicas de control discreto en lazo cerrado sobre plantas físicas. Con efecto de demostrar el comportamiento del controlador, se toma una placa térmica como proceso de estudio; en la cual se aplican las diferentes leyes de control programadas en el controlador CONTROL-LAB. Para validar el buen funcionamiento del controlador se realizaron pruebas y los resultados reales obtenidos se validaron comparando con los resultados arrojados bajo simulaciones numéricas. Finalmente, los resultados obtenidos demuestran el buen desempeño del controlador para la placa térmica.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

En los últimos años se ha producido un considerable aumento en el uso de controladores digitales en los sistemas de control en todas las áreas de la ingeniería, desde las grandes industrias hasta pequeñas aplicaciones del hogar. Los controladores digitales usualmente son implementados con microprocesadores, microcontroladores; y necesitan conversores ADC y DAC para comunicación entre las señales analógicas de la planta y la PC.

Tienen las ventajas de implementar los diseños de una manera sencilla, presentan un comportamiento preciso y además la posibilidad de implementar algoritmos complejos. También incluye la posibilidad de almacenar los datos históricos del proceso, monitorización gráfica y en línea, portabilidad de los computadores de hoy en día.

Las tendencias actuales se inclinan al uso de sistemas digitales, sustituyendo paulatinamente a los sistemas analógicos tanto en el ámbito industrial, como ahora en el ámbito educacional de la Ingeniería de Control desarrollando sistemas integrados de control digital y su software correspondiente.

En el estudio de la Ingeniería de Control está contemplada la Teoría Clásica de Control y se refuerzan estos conocimientos con trabajos prácticos. “Estas herramientas se pueden utilizar para mostrar conceptos, proporcionar nuevas perspectivas de un problema y para ilustrar cuestiones de análisis y diseño. A estas herramientas las denominamos Sistemas o laboratorios virtuales interactivos” (S. Dormido 2002).

En el desarrollo de este trabajo hemos utilizado diversas herramientas para la simulación de sistemas, toma de datos e implementación de lazos de control. Se utilizaron los softwares Matlab, interfaz del LabJack U3-HV, y Python como lenguaje de programación, tanto para simulaciones realizadas de los lazos de control y como para la implementación real de dichos lazos y posterior comparación de las simulaciones con los datos reales obtenidos. Es importante recalcar que utilizando software y control digital es muy sencillo cambiar o adaptar el controlador que se está implementando en un momento dado.

2 Procedimiento Experimental

2.1 Descripción, Instrumentación y adquisición de datos de la planta.

La placa térmica como sistema físico consiste en la generación de calor a partir de energía eléctrica, se realizó el proceso de instrumentación necesario para realizar el acondicionamiento de la señal y adquisición de datos de la planta a la PC.

La adquisición de datos consiste básicamente en realizar mediciones de un fenómeno físico usando un computador. Un poco más a fondo, el sistema toma de muestras

del mundo real y los digitaliza para generar datos que puedan ser manipulados por un computador. Un sistema de Adquisición de Datos (DAQ) consiste en sensores como parte del hardware y una PC con software programable.

A diferencia de los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad estándares en la industria y de las nuevas computadoras. De esta forma se tiene una solución de medidas más potente, flexible y rentable.



Figura 1.- Sistema de adquisición de datos.

Como muestra la figura 1 el proceso de adquisición de datos comienza con un sensor, el cual convierte un fenómeno físico en una señal eléctrica que pueda ser medida, esta medida luego pasa a un dispositivo DAQ, el cual actúa como la interfaz entre una PC y señales del mundo exterior. Funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que una PC pueda interpretarlas. Dicha PC debe tener un software programable el cual controla la operación del dispositivo DAQ y es usada para procesar, visualizar y almacenar datos de medida. En nuestro caso la PC también se usa para implementar el controlador CONTROL-LAB, para realizar acciones de control sobre la planta que son transmitidas también por el dispositivo DAQ usado, la tarjeta de adquisición de datos LabJack U3-HV, y realizadas por el actuador.

La entrada de energía al sistema es proporcionada por la tarjeta de adquisición de datos LabJack U3-HV, la cual suministra un voltaje de 0-5 V, y una corriente máxima de 50mA, lo cual no es suficiente para calentar correctamente la placa, pues debe ser alimentada por una fuente desde 0 V a 12 V, para solucionar este problema se desarrolló un circuito amplificador el cual está encargado de amplificar el voltaje y la corriente suministrados por el LabJack.

Como se observa en la figura 2 la salida de voltaje del LabJack es conectada al circuito amplificador el cual posee una ganancia y el voltaje amplificado es conectado a la base del transistor, éste tiene conectado una fuente de 18V a su terminal colector, para amplificar la corriente, y conectando el terminal emisor del transistor a las resistencias de la placa.

Las resistencias están fijas sobre la placa de aluminio, por consiguiente, el calor generado por las resistencias es transferido por contacto a la placa. La respuesta del sistema es lenta, es decir, el proceso de transferencia del calor de las resistencias a la placa no se da de forma inmediata, se debe esperar el tiempo necesario para que la temperatura de la

placa alcance su punto estable, no varíe, para determinado valor de voltaje de entrada.

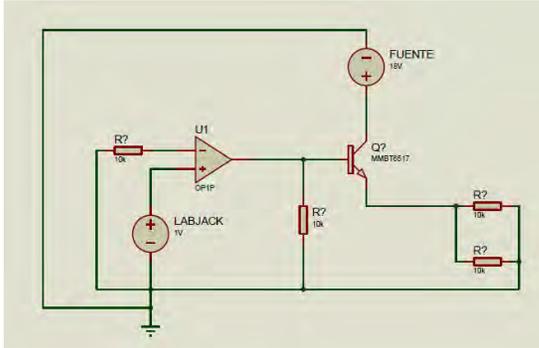


Figura 2.- Circuito amplificador de entrada a la placa.

Finalmente, la salida del sistema es la temperatura que alcanza la placa. Esta temperatura se mide usando el termopar cuyo extremo está en contacto con un punto de la placa, éste produce un voltaje en el orden de los mV proporcional a temperatura de la placa.

El voltaje que emite el termopar es muy pequeño, hace que la medición del mismo no se pueda hacer de manera efectiva usando el LabJack, por lo cual fue necesaria la implementación de otro circuito amplificador para acondicionar la señal de salida para que pueda ser medida por el LabJack. El termopar es un instrumento que en sus extremos transmite una diferencia de potencial, por la cual se diseñó un amplificador de instrumentación el cual tiene una alta impedancia de entrada y un alto rechazo al modo común, amplificando así la diferencia de potencial transmitida por el termopar, el circuito diseñado está representado en la figura 3.

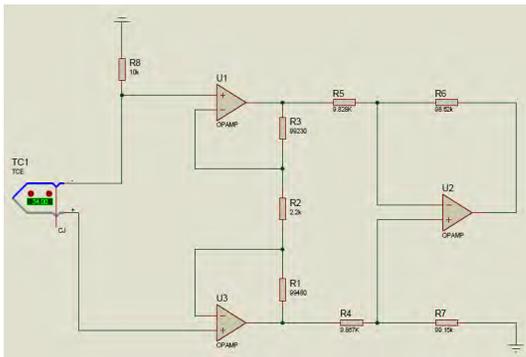


Figura 3.- Circuito amplificador de salida de la placa.

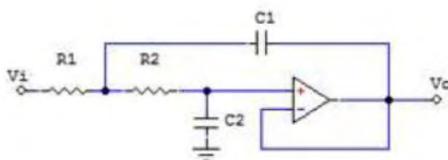


Figura 4.- Filtro Sallen Key.

Para el acondicionamiento de la señal se introdujo un filtro analógico después del circuito amplificador de la señal del termopar y antes de la entrada al LabJack. Se elige un filtro de tipo Sallen Key o célula de Sallen Key, que es un tipo de filtro electrónico activo particularmente valioso por su simplicidad. El circuito produce un filtro pasa bajo o pasa alto de dos polos usando dos resistencias, dos condensadores y un amplificador. Se configuró como un paso bajo con frecuencia de corte de 15Hz, quedando una configuración como la que se muestra en la figura 4.

Se procedió a conectar la configuración de filtro mostrada con entrada de la señal del termopar amplificada, la salida del filtro al puerto AINO del LabJack. Adicionalmente se conectó la señal del termopar sin filtrar al puerto AIN1 para posterior comparación de las señales. Se introdujo a través de código en Matlab con conexión al LabJack un voltaje de 2V al sistema, y se tomaron los datos del cambio de voltaje en el termopar, la respuesta temporal del sistema en lazo abierto, correspondiente al cambio de la temperatura. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5 y 6.

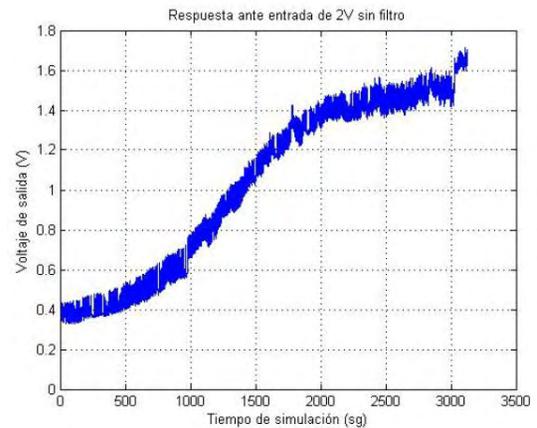


Figura 5.- Respuesta temporal en lazo abierto del sistema sin filtro ante entrada de 2V.

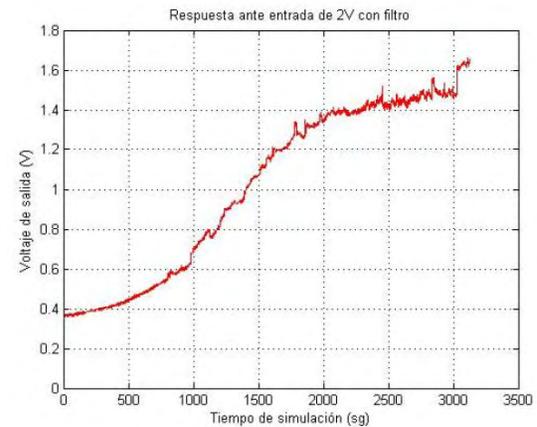


Figura 6.- Respuesta temporal en lazo abierto del sistema con filtro ante entrada de 2V.

2.2 Identificación del modelo de la planta.

Se decide obtener el modelo matemático del sistema mediante identificación debido a la alta complejidad de modelar el sistema de la placa térmica mediante ecuaciones diferenciales usando leyes físicas. Con el proceso de identificación se obtuvo un modelo en tiempo continuo, discretizándolo después, también se obtuvo directamente un modelo discreto. Cabe destacar que para ambos métodos se utilizó la herramienta de software Matlab.

Para la identificación se procede a tomar varias muestras, las cuales se obtuvieron suministrando distintos valores de entrada alrededor de un punto de operación, usando un tiempo de muestreo (T_0) de 0.5s, lo cual cumple que es por lo menos 10 u 8 veces más rápido que el tiempo de subida de la planta con lo cual nos aseguramos de no perder información debido a un alto tiempo de muestreo. Las muestras tomadas fueron las siguientes:

1. Entrada 2V y excitación de +0.4V
2. Entrada 2V y excitación de -0.4V
3. Entrada 2.2V y excitación +0.4V
4. Entrada 2.2V y excitación -0.4V

En la figura 7 y 8 se muestran las respuestas obtenidas a la salida de la planta para las 3 y 4 respectivamente.

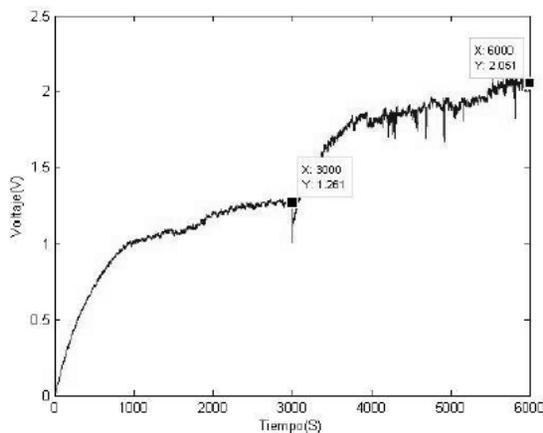


Figura 7.- Respuesta con entrada 2.2V y excitación +0.4V.

Se seleccionan las muestras que serán utilizadas para identificar y para validar el modelo, en este caso para identificar utilizaremos los datos de entrada 2.2V y excitación -0.4V y para validar el modelo obtenido será utilizado los datos de entrada 2.2V y excitación +0.4V, se observa que el sistema tiene un comportamiento sobre amortiguado y se asemeja a un sistema de primer orden para lo cual se identi-

$$G(s) = \frac{0.5452}{353.8s + 1} \tag{1}$$

fica a un modelo de dos parámetros, obteniendo el modelo como función de transferencia que se muestra en la ecuación 1.

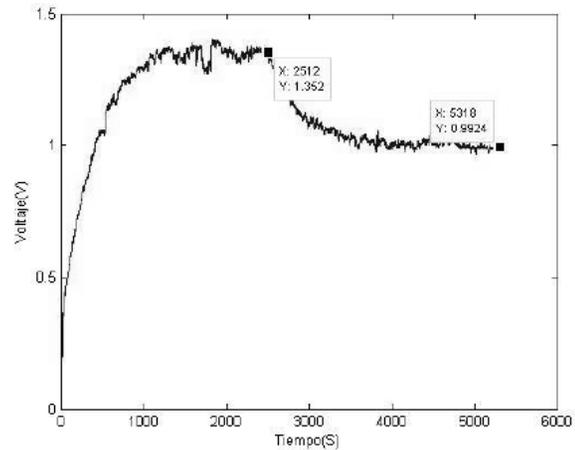


Figura 8.- Respuesta con entrada 2.2V y excitación -0.4V.

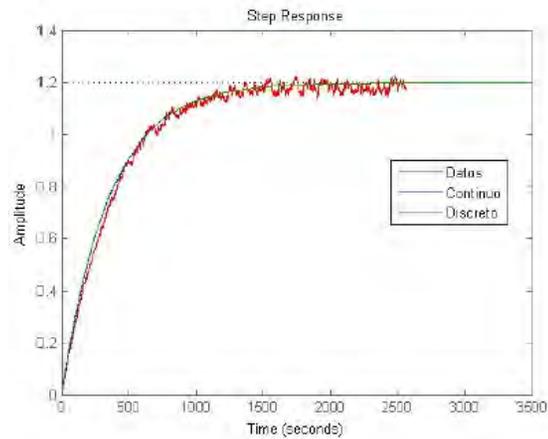


Figura 9.- Comparación de los modelos discreto y continuo con los

$$G(z) = \frac{0.0007699}{z - 0.9986} \tag{2}$$

datos tomados.

Se procede a discretizar el modelo, se usa el método de discretización trapezoidal por integración numérica, y compararlo con los datos tomados de la planta en la figura 7. El modelo discreto obtenido a partir del modelo identificado se describe con la ecuación 2.

$$B(z) = 1.354 * 10^{-6} + 1.365 * 10^{-6} z^{-1} \tag{3}$$

$$F(z) = 1 - 1.995 z^{-1} + 0.9953 z^{-2}$$

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} u(t) + e(t) \tag{4}$$

En la figura 10 se identifican los diversos modelos no paramétricos discretos utilizados, el modelo que mejor aproximación tiene a los datos de validación es el Output-Error Model que se ve en la ecuación 3 y 4.

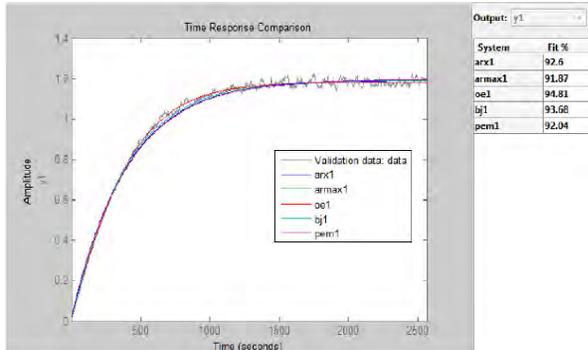


Figura 10.- Comparación de los modelos discretos con los datos tomados.

2.3 Diseño de los Controladores.

La respuesta del modelo de la planta ante una entrada escalón unitario tiene un tiempo de asentamiento de 1380s y un valor en estado estacionario de 0,545V.

Se desea que el valor en estado estacionario siga la entrada de referencia, es decir que tenga un error en estado estacionario de 0V, otra especificación a considerar para el diseño del controlador es una mejora en la parte transitoria del sistema, es decir una mejora del tiempo de asentamiento disminuyéndolo a unos 1000s. Adicionalmente se tiene que tomar en consideración para el cálculo de las constantes del controlador que además de alcanzar los requerimientos de diseño explicados anteriormente, que la señal de control este entre los límites permitidos por la salida de la Labjack U3-HV, la cual es de 0V-5V.

Se diseñaron 3 tipos de controladores, el primero fue un controlador de tipo PI en tiempo continuo que luego se discretizó para su implementación, un controlador PI completamente diseñado en tiempo discreto y el último fue un Controlador por Modelo Interno (IMC) en tiempo continuo que se discretizó para su implementación.

2.3.1 Controlador PI en Continuo.

Luego del proceso de diseño, la función de transferencia del controlado PI diseñado queda como se ve en la ecuación 5.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = C(s) = 1,9847 + \frac{0,004787}{s} \quad (5)$$

Para la obtención de la ecuación de recurrencias (implementable en digital) que se ajuste el controlador PI en continuo diseñado se usa el algoritmo de velocidad para discretizar y tomando un tiempo de muestreo de $T_0 = 0,5s$. La ecuación del controlador en discreto queda expresada

$$U(k) = U(k-1) + 2,1593 \cdot e(k) - 2,1575 \cdot e(k-1) \quad (6)$$

por la ecuación 6.

2.3.2 Controlador PI en Discreto.

Para el controlador en tiempo discreto se propone el diseño de un controlador PI en discreto, el cual viene dado por la ecuación 7

$$G_c(z) = \frac{zq_0 + q_1}{z - 1} \quad (7)$$

Se hayan los parámetros del controlador de manera de cumplir con las especificaciones antes mencionadas, y se obtienen los parámetros dados por las ecuaciones en 8.

$$\begin{aligned} q_0 &= 0,7793219899 \\ q_1 &= -0,7793219899 \end{aligned} \quad (8)$$

2.3.3 Controlador IMC en Continuo.

Se realiza el diseño del controlador por el método de IMC, en donde se escoge un $B=230$, de manera de cumplir con las especificaciones deseadas y expresado por la ecuación 9.

$$G(s) = \frac{1,0000000}{1.000\ 000\ 00Bs + 1} \quad (9)$$

Una vez obtenido este controlador se procede a llevarlo a una configuración del tipo PI, lo cual es posible ya que el modelo de la planta el cual fue usado para el cálculo del controlador es de primer orden, obteniendo así un controlador del tipo PI, en discreto expresado por la ecuación 10.

2.4 Implementación de CONTROL-LAB.

$$\begin{aligned} q_0 &= 3,6480 \\ q_1 &= -3,64 \end{aligned} \quad (10)$$

$$U(k) = U(k-1) + 3,6480e(k) - 3,64e(k-1) \quad (13)$$

Para implementar los controladores diseñados se implementaron dos programas en el lenguaje de programación Python, uno de los cuales se encarga de muestrear la señal analógica, comparando ésta con la referencia y calcular la señal de control mediante la ecuación control calculada y seleccionada, este programa manda mediante una comunicación de procesos la data obtenida al otro programa en Python que se encarga de guardar los datos en archivos de

texto y de realizar una gráfica a tiempo real del proceso. Se hizo de esta manera ya que, si el programa se encarga de muestrear, guardar y de graficar, al mismo tiempo no trabaja a tiempo real para frecuencias de muestreo muy pequeñas. La implementación de estos programas para controladores en conjunto con el módulo de conexión que se desarrolló para el Labjack U3-HV y así integrar la PC con la planta física se denominó CONTROL-LAB, controlador digital que permite aplicar diferentes técnicas de control discreto en lazo cerrado sobre plantas físicas.

2.5 Implementación del lazo cerrado de control con CONTROL-LAB.

Para el análisis práctico de los controladores diseñados, se procede a seleccionar un valor de referencia, y con la tarjeta de adquisición de datos Labjack U3-HV se procede a medir de manera digital la salida de la placa térmica, luego con la misma tarjeta de adquisición de datos se emite una señal analógica de control para calentar la placa térmica, guardando los siguientes valores.

- Salida de la planta $Y(k)$
- Señal de control $U(k)$
- Señal de error $e(k)$

Se colocó una referencia de 1,5V obteniendo y almacenando la respuesta de la planta para dicha entrada, y siempre comparando con la simulación del modelo obtenido en Matlab. Se almacenan también las señales de error y de control. Este procedimiento se realizó para cada uno de los controladores diseñados.

3 Discusión y Resultados

Con los controladores diseñados en lazo cerrado, tanto el modelo simulado, como los datos obtenidos llegan al valor de referencia deseado con buena aproximación, y en el tiempo establecido por las especificaciones de diseño planteadas. Se puede observar dicho comportamiento en la gráfica de la figura 11.

El mismo comportamiento se observa en la gráfica de la figura 12, al llevar el voltaje de salida de la planta a grados centígrados mediante las relaciones adecuadas de la tabla del termopar. De esta manera se puede decir que los controladores cumplen las especificaciones de diseño deseadas.

También es necesario analizar las señales de control y de error, las cuales se observan en las figuras 11 y 12 respectivamente, es claro que la señal de control en el instante de tiempo cero empieza en un valor alto debido a que el controlador intenta corregir el error rápidamente como se aprecia en la figura 11, donde las señales comienzan en un valor alto y luego disminuyen hasta cero con la misma dinámica que la de la salida del sistema y a medida que ésta se acerca a cero, las señales de control se aproximan hacia un valor estable en el cual mantendrá la placa en la temperatura deseada. Esto ocurre con los controladores implementados.

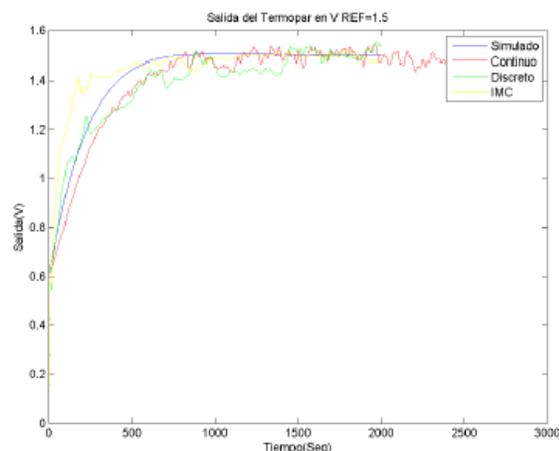


Figura 11.- Comparación de las señales de salida del Sistema controlado con Ref=1,5V.

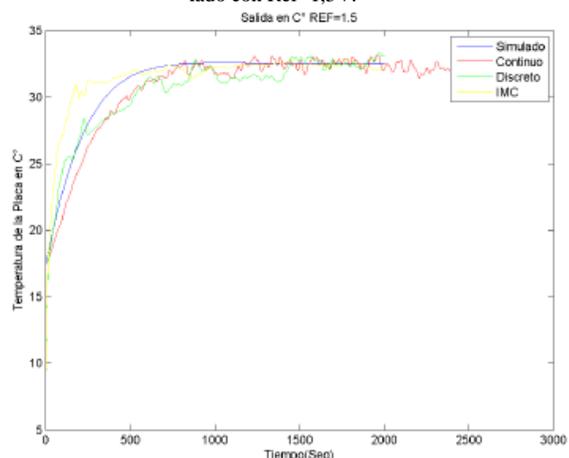


Figura 12.- Comparación de las señales de salida del Sistema controlado con Ref=1,5V en grados Centígrados.

Sobre estas señales es importante resaltar que se mantienen entre los límites aceptados por los instrumentos físicos utilizados, entre 0-5V y el error tiende satisfactoriamente a cero cuando la salida del sistema llega a su estado estable.

Se puede apreciar para la gráfica de las señales de control obtenidas que se presenta mucho ruido ya que para la medida de estas señales no se implementó un filtro analógico.

La salida del sistema con los controladores diseñados en continuo y en discretos tiene un comportamiento muy similar y un poco más lento que la simulación que representa la salida esperada del sistema. La diferencia más resaltante es que con el controlador de diseño por IMC la salida del sistema tanto en voltaje como grados centígrados es un poco más rápida que la esperada y sube al valor final con mayor pendiente, pero todas cumplen satisfactoriamente con las especificaciones de diseño de control para la planta.

Igualmente, para las señales de error y de control, figuras 13 y 14 respectivamente, el diseño por IMC es más rá-

vido y difiere un poco de las señales de controladores anteriores. Sin embargo, es claro que tienen el mismo comportamiento y están dentro de los rangos adecuados.

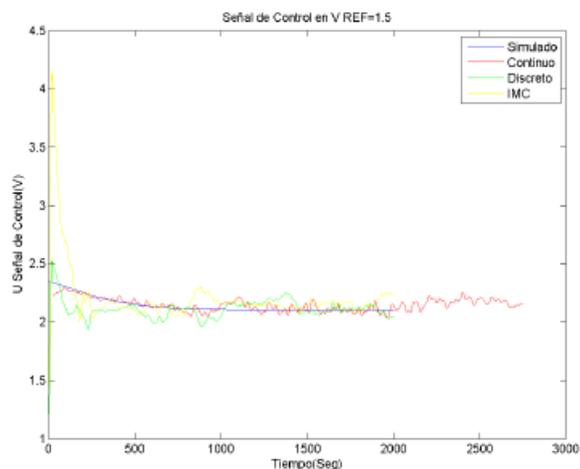


Figura 13.- Comparación de las señales de control del Sistema controlado con Ref=1,5V.

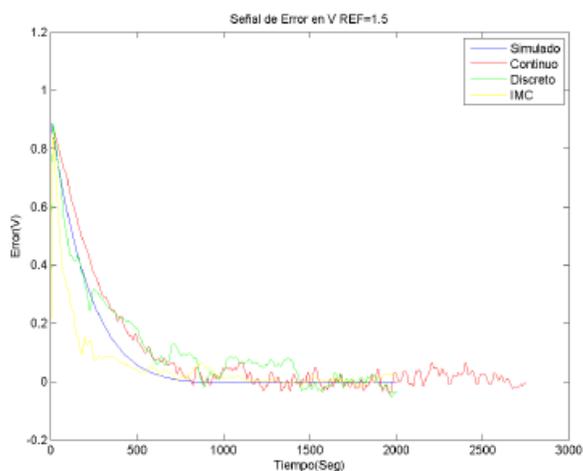


Figura 14.- Comparación de las señales de error del Sistema controlado con Ref=1,5V.

4 Conclusiones

Se realizó un trabajo completo de montaje, análisis e identificación de una placa térmica como sistema físico para probar el funcionamiento del Controlador Digital CONTROL-LAB, que se realizó con la finalidad de afianzar conocimiento de los métodos de control tradicionales, pero al mismo tiempo manejar las nuevas técnicas de control digital.

Se diseñaron tres controladores por diferentes métodos para la planta física a partir de las mismas especificaciones de diseño. Aunque hay diferencia en cuanto a sus estructuras y técnicas para el diseño, son equivalentes ya que se lograron implementar en el mismo controlador digital con resultados muy similares. Luego de comparar los datos

obtenidos en los diferentes experimentos con las simulaciones correspondientes en Matlab, se afirma que se logró cumplir los requerimientos de diseño planteados. Y además se obtuvieron la señal de control y error dentro del rango esperado.

La implementación de cada controlador no presenta mayor dificultad, ya que se usó la misma instrumentación y software para todos los diseños. Se comprueba entonces la versatilidad y efectividad de la implementación de leyes de control digitales a un sistema real, ya que es sencillo cambiar los parámetros e ir de un controlador a otro, la facilidad que aporta la interfaz con el usuario y posibilidad del almacenamiento de datos para su posterior estudio y análisis.

Referencias

- Gómez JC, 2007, Identificación de sistemas. Laboratorio de Sistemas Dinámicos y Procesamiento de la Información FCEIA, Universidad Nacional de Rosario.
- Guerrero Naboja M, 2012, Determinación de los parámetros de un controlador PID para una planta con función de transferencia conocida. Publicado en: www.academia.edu
- Lopez Guillén ME, Identificación de Sistemas. Aplicación al modelado de un motor de continua. Departamento: electrónica.
- Puerto J, Rincón L; Jacinto E., Control robusto por modelo interno aplicado como laboratorio virtual a un péndulo motorizado. 2011.
- Rodríguez Robledo CE, Diseño de un controlador PID en tiempo discreto.
- Dormido S, Control learning: Present and future. IFAC WorldCongress, 15 de julio de 2002.
- https://en.wikipedia.org/wiki/Sallen%E2%80%93Key_topology. Fecha de consulta: 12 septiembre 2016.
- https://es.wikipedia.org/wiki/Adquisici%C3%B3n_de_datos. Fecha de consulta: 12 septiembre 2016.
- http://isa.uniovi.es/docencia/ra_marina/UCLM_TEMA11.PDF. Fecha de consulta: 12 septiembre 2016.
- <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa>. Fecha de consulta: 12 septiembre 2016.

Ortega, Heyzel: Estudiante de Ingeniería de Sistema en la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Cóndor, Claudio: Estudiante de Ingeniería de Sistema en la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: claucondor@gmail.com

Quintero, Jormany: MSc.Ingeniero de Sistemas. Profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes. Escuela de Ingeniería de Sistemas. Correo electrónico: jormany@ula.ve

Estudio experimental de la influencia de la formulación fisicoquímica de un sistema polifásico sobre la mojabilidad de sólidos

Tolosa, Laura^{1*}; Bouriat², Patrick; Rondón², Miguel; Salager, Jean-Louis¹; Lachaise, Jean²

¹Laboratorio Firp, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela

²Laboratoire des Fluides Complexes, UMR 5150, Université de Pau et Pays de l'Adour, France

* lauratolosa.ula.ve@gmail.com

Resumen

Se estudió el efecto del grado de etoxilación de surfactante noiónico del tipo nonilfenoletoxilado, expresado a través del valor de HLB, sobre el ángulo de contacto de avance del sistema vidrio/fase-acuosa/secbutanol/crudo. El HLB se varió entre 4.3 y 16.7 a partir de mezclas de surfactantes comerciales, a una concentración fija de surfactante de 240 ppm. Las superficies de vidrio empleadas para las mediciones de ángulo de contacto fueron tratadas previamente con soluciones de crudo para producir su hidrofobación por la adsorción de los componentes polares (asfaltenos). Se midió la tensión interfacial entre las soluciones de crudo en ciclohexano y la fase acuosa del surfactante noiónico dentro del mismo rango de HLB usado en las mediciones de ángulo de contacto. Se observó el cambio de la mojabilidad del sistema de hidrofóbico a hidrofílico con el incremento del HLB del surfactante. Los valores medidos de ángulo de contacto de avance variaron desde hidrofóbicos $\theta > 90^\circ$ (141°) hasta un comportamiento completamente hidrofílico con $\theta = 0^\circ$ para un HLB de 12.5, cuando se alcanzó el valor mínimo de tensión interfacial del sistema. A partir de este valor de HLB y superiores, no fue posible la adherencia de la gota de la solución de crudo a la superficie de vidrio, lo que técnicamente corresponde a $\theta = 0^\circ$. Estos resultados podrían apoyar las evidencias experimentales de la mejor recuperación del crudo en las condiciones óptimas de la EOR.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

Las superficies minerales de los reservorios y pozos petroleros, lejos de mantener su afinidad natural por el agua, lo que en química de superficies se suele llamar una mojabilidad preferencial hacia el agua o hidrofílica, exhiben en cambio una mojabilidad mixta (Salathiel 1973) o en muchos casos totalmente hacia el aceite. El contacto entre las rocas minerales y el crudo puede producir la adsorción de los componentes más polares que lo componen, debido por un lado a la alta energía superficial de estos sustratos producto de los enlaces iónicos, covalentes o metálicos que predominan en este tipo de superficies, y por el otro, debido a la naturaleza activa a nivel superficial, de estas moléculas orgánicas polares conocidas como la fracción de asfaltenos del crudo (Benner y col., 1941). Estas dos condiciones terminan produciendo el cambio de mojabilidad de las superficies minerales de hidrofílica a mixta o a totalmente hidrófoba (Freery col., 2003).

Una de las consecuencias obvias de este cambio de mojabilidad es la generación de condiciones favorables en el reservorio para que una cantidad considerable de crudo quede fuertemente atrapado en los poros del mismo. La extracción de estas fracciones de crudo se ha mejorado notoriamente con el uso de agentes tensoactivos en lo que se conoce como recuperación terciaria o recuperación mejorada (EOR, correspondientes a las siglas de su denominación en inglés Enhanced Oil Recovery). La acción del surfactante de disminuir la tensión interfacial entre el crudo y la fase acuosa presente en el reservorio ha sido uno de los aspectos fundamentales más estudiados en la recuperación mejorada. Sin embargo, y dado que las moléculas de surfactante tienen doble afinidad, hoy en día se ha venido prestando una mayor atención al efecto que sobre la mojabilidad de las paredes del reservorio y sobre el fenómeno de adsorción de crudo en ellas, produce la adición de este tipo de moléculas. El presente trabajo pretende ser un aporte al conocimiento que se ha logrado sobre este tema.

2 Marco Teórico

2.1 Mojabilidad en pozos

En las formaciones rocosas de los pozos, la extensión del cambio de mojabilidad depende de la composición del crudo, de la presencia y composición de la fase acuosa asociada, que normalmente contiene algún tipo de electrolito (salmuera), así como también del grado de saturación, del tiempo de envejecimiento (tiempo del contacto crudo/sustrato mineral) y de la temperatura (Liu y col., 1997). De acuerdo a la combinación de variables que se presente, los mecanismos a través de los cuales los componentes del crudo pueden adsorberse sobre las superficies minerales pueden variar, incluyendo interacciones polares, interacciones ácido-base e interacciones del tipo de enlaces iónicos. Del mismo modo,

la precipitación superficial de la fracción de asfaltenos del crudo puede también alterar la mojabilidad del sustrato sólido (Buckley y col., 1998).

Para facilitar los estudios de mojabilidad de los reservorios de petróleo, se ha hecho necesario la generación de modelos que incluyan y representen las complejas interacciones entre el crudo – salmuera – sustrato mineral. Para las superficies minerales se suele emplear cuarzo cristalino o diferentes superficies de vidrio, como la mica. Sin embargo, aún no ha sido fácil establecer la correspondencia entre los cambios de mojabilidad de estas superficies modelos con los efectos reales que tendrían en los núcleos de los reservorios.

Estudios previos sobre superficies planas de cuarzo o vidrio han mostrado una fuerte dependencia del tipo de interacciones que se dan entre los componentes del crudo y las superficies sólidas con la presencia y composición de una fase acuosa (Liu y col., 1997). Cuando no hay presencia de agua, las interacciones importantes son las que se producen entre las moléculas orgánicas con grupos polares del crudo (asfaltenos) y la superficie mineral por naturaleza de carácter polar. En estos casos, la adsorción de los asfaltenos varía en función de la concentración, del solvente, y de la superficie mineral sobre la que se adsorben (Czarnecka y col., 1980; Glotony col., 1992). Por otro lado, la presencia de agua involucra interacciones entre iones y grupos ionizables (ácidos o bases) presentes en las interfases involucradas crudo/agua y sólido/agua.

2.2 Determinación de la mojabilidad a través de la medición del ángulo de contacto

La modificación de la mojabilidad de las superficies de vidrio o cuarzo suele estimarse a través de la medición del ángulo de contacto antes y después de haberse producido el contacto sólido/crudo. El ángulo de contacto es aquel que se forma al contacto de una gota de agua (aceite) con el sustrato sólido, donde tanto la superficie como la gota están sumergidos en un medio oleico (acuoso). La Fig. 1 muestra una gota de agua con forma de casco esférico que define un ángulo θ al contacto con la superficie del sólido. Se señala la *línea de contacto trifásico* donde convergen la frontera aceite/agua (interfase de la gota) y la frontera aceite/sólido (superficie del sólido), y donde las tres fases presentes están en contacto simultáneo entre sí (aceite/agua/sólido).

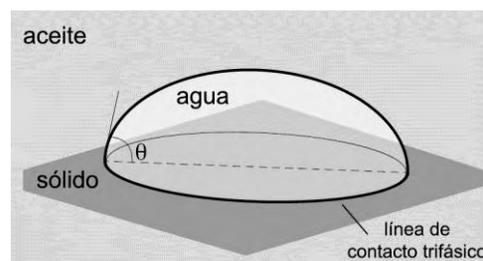


Fig. 1. Gota de agua sobre sustrato sólido que define un ángulo de contacto θ , medido desde la fase acuosa.

Teóricamente, el ángulo de contacto puede obtenerse a partir de las fuerzas intermoleculares que actúan sobre la línea de contacto. Si se consideran las tensiones superficiales e interfaciales como las fuerzas que actúan a lo largo del perímetro de la gota (línea de contacto), se puede escribir la conocida ecuación de Young, que describe el balance de fuerzas al equilibrio en la dirección horizontal (como se indican en la Fig. 2) como

$$\gamma_{ow} \cos \theta = \gamma_{os} - \gamma_{ws} \quad \text{ec. 1}$$

El ángulo de contacto definido por la ecuación de Young es un valor ideal, ya que corresponde a un equilibrio termodinámico del sistema, que en la práctica es muy difícil de alcanzar. Por el contrario, condiciones de rugosidad, heterogeneidad y/o existencia de una película adsorbida sobre la superficie del sustrato sólido causan que los valores de ángulo medidos experimentalmente, sean más altos o más bajos que el valor teórico de Young.

El ángulo de contacto, medido de la forma como se acaba de explicar, representa un valor estático que da información sobre la naturaleza superficial y la mojabilidad del sustrato en las condiciones de medición. Sin embargo, en muchas aplicaciones, es más valioso y útil conocer la “estabilidad” del ángulo formado cuando se fuerza a la gota a fluir o desplazarse sobre la superficie donde reposa, como en el caso de los estudios de recuperación mejorada de petróleo, donde la estabilidad del ángulo de contacto influye notoriamente en la recuperación final del aceite que queda atrapado en los poros del pozo (Freery col., 2003).

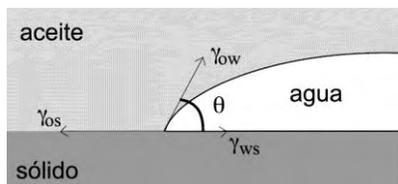


Fig. 2. Definición de θ a partir de las tensiones interfaciales y superficiales que actúan sobre la línea de contacto de tres fases aceite/agua/sólido.

El procedimiento experimental que se sigue en estos estudios consiste en hacer avanzar o retroceder la línea de contacto trifásico, es decir, en inyectar (succionar) más líquido a la gota para producir su crecimiento (disminución de tamaño) y por tanto observar el movimiento de avance (retroceso) de la frontera aceite/agua sobre la superficie aceite/sólido. En condiciones ideales (fluidos súper puros y superficie lisa y homogénea) el ángulo estático al equilibrio se mantiene, y la gota cambia de tamaño sin cambiar el valor del ángulo.

En condiciones reales, el escenario es diferente, se evidencia un anclaje temporal de la línea de contacto trifásico (debido a rugosidades y heterogeneidades de la superficie) antes de que se produzca el movimiento de la misma, ya sea avanzando con un ángulo superior o

retrocediendo con un ángulo inferior respecto al medido en condiciones de reposo. Los dos valores diferentes de ángulo que pueden medirse reciben por tanto el nombre de ángulo de avance (θ_A) y ángulo de retroceso (θ_R), respectivamente, y la diferencia entre estos ellos se conoce como *histéresis del ángulo de contacto*. Se han medido histéresis de hasta 130° en sistemas crudo/salmuera/sustrato mineral, y se ha encontrado que es un factor determinante en la evolución de la mojabilidad mixta de un reservorio (Freery col., 2003).

Freery y coautores (2003) encontraron que los valores de θ_A y θ_R controlan fuertemente los mecanismos a nivel de poro relacionados con el drenaje del crudo y la imbibición de agua, que se producen en los procedimientos de recuperación de petróleo. Los autores clasifican estos mecanismos en función de los dos valores de ángulo, luego de producirse la adhesión del crudo en las paredes minerales, evidenciándose grandes diferencias en el comportamiento relativo de ambos fluidos.

2.3 Adición de surfactantes

La recuperación del crudo de un pozo, luego de haberse extraído de acuerdo a la primera y segunda etapa, por presión natural del pozo y por succión o empuje con agua o gas, respectivamente; normalmente se conoce como recuperación mejorada, ya que es aquella que permite el acceso al crudo que no pudo ser extraído en las dos primeras fases del proceso. La recuperación mejorada se caracteriza por el empleo de agentes tensoactivos (surfactantes) capaces de disminuir la tensión interfacial entre el aceite y el agua, lo que facilita notoriamente el desplazamiento de los fluidos en el pozo, sobre todo si se consigue la condición o formulación óptima (condición en la que la tensión entre ambos fluidos es mínima). El empleo de surfactantes ha sido ampliamente estudiado en términos de su capacidad de disminuir la tensión interfacial entre el crudo y la fase acuosa presentes en el reservorio. A partir de los trabajos de (Salathiel 1973) sobre mojabilidad mixta de los sustratos minerales, y más recientemente, se ha venido prestando atención al efecto que tiene la adición de estos surfactantes sobre el comportamiento de la mojabilidad de las paredes del reservorio y el fenómeno de adsorción de crudo sobre dichas superficies.

La característica más importante de las moléculas de surfactantes es su naturaleza anfifila (*anfi*: doble, de ambos lados; *filo*: afinidad), presentando doble afinidad. Su estructura molecular está compuesta por dos partes, una polar afín al agua (hidrofílica) y otra apolar o lipofílica afín al aceite. Griffin (1949) introdujo el concepto de balance hidrofílico- (HLB) como una escala empírica con la intención de describir el balance en los efectos de los grupos hidrofílicos y lipofílicos de la molécula de surfactante.

Para los surfactantes polietoxilados, se estableció el HLB igual a veinte (20) veces la fracción en peso del grupo polióxido de etileno (EO). Por ejemplo, para un nonilfenol puro con cinco grupos EO, el HLB resultante es 10. Ya que

en estas especies las partes hidrofílicas y lipofílicas tienen exactamente el mismo peso, se suele considerar de manera general que $HLB < 8$ ($HLB > 12$) indica un surfactante lipofílico (o hidrofílico).

Dada su doble afinidad, los surfactantes se ubican preferencialmente en interfases (fluido/fluido) y superficies (fluido/sólido). Para el caso de los sistemas trifásicos crudo-salmuera-sustrato mineral, los surfactantes disponen de las fronteras crudo-salmuera, crudo-sólido y salmuera-sólido, donde pueden adsorberse de acuerdo a su estructura molecular y la polaridad de las fases involucradas. Sobre superficies minerales de alta energía, y en ausencia de cualquier otra sustancia capaz de hacerlo, las moléculas de surfactante se adsorben dirigiendo su parte polar (cabeza) hacia el sustrato y dejando las cadenas a-polares (cola) hacia el fluido, causando un cambio de mojabilidad de la superficie, de hidrofílica a lipofílica, que irá evolucionando a medida que el cubrimiento se haga cada vez más completo. En el caso de interfases aceite/agua la adsorción del surfactante se da con la cabeza polar hacia el agua y la cola lipofílica hacia el aceite.

Cuando en el sistema hay presencia de otras sustancias surfactantes, como las que ocurren naturalmente en el crudo (moléculas de asfaltenos y resinas), la situación es más compleja. A la interfase se dará simultáneamente la adsorción de todas estas sustancias, las inherentes al sistema así como el surfactante adicionado para efectuar la recuperación del crudo, produciéndose una mezcla interfacial cuyas propiedades resultan intermedias entre los valores que cada sustancia aporta (ej. HLB) (Rondón y col., 2006)

Una de las situaciones de mojabilidad que ocurren en los reservorios involucra el acercamiento de glóbulos de aceite a las paredes de las rocas, donde se produce el contacto entre la interfase crudo/agua (salmuera) y la superficie sólida que ha desarrollado una mojabilidad mixta.

La presencia de mezclas de sustancias en ambas fronteras no permite hacer predicciones directas sobre el comportamiento de la mojabilidad en tales sistemas. El presente trabajo se diseñó para estudiar el efecto del HLB, específicamente el tamaño de la cabeza polar de la molécula, de surfactantes nonilfenoletoxilados presentes en la fase acuosa, sobre el ángulo de contacto que forma la interfase crudo-fase acuosa sobre una superficie de vidrio tratada con crudo. Se observó también la capacidad de adhesión de las gotas de crudo sobre estas superficies. Con este trabajo se pretende aportar mayor información sobre el comportamiento de la mojabilidad de los sustratos minerales cuando hay presencia simultánea de crudo y surfactantes, frente a un cambio sistemático del HLB del surfactante.

3 Materiales y Métodos

3.1 Materiales

Se empleó agua destilada en las soluciones de surfactantes hidrofílicos. El aceite usado fue un crudo francés (Vic-BilhOil, extraído por Total en Francia) con una gravedad API de 18 y densidad de 0,946 g/cc. Se emplearon dos soluciones diferentes del crudo. La primera consistió en la dilución del crudo en tolueno para el tratamiento de las placas de vidrio. La segunda, consistió en la dilución del crudo en ciclohexano para la disolución del surfactante y para la formación de la gota en las mediciones de ángulo de contacto. La concentración de asfaltenos en cualquiera de las diluciones efectuadas fue de 500 ppm.

Se utilizaron surfactantes no iónicos del tipo ésteres de sorbitan de la familia Tween-Span, suministrados por SEPPIC, Francia, con diferentes grados de etoxilación (EO), cuyos valores de HLB variaron en el rango de 4.3 a 16.7. Los surfactantes se usaron tal como fueron recibidos. Se prepararon soluciones en agua destilada o ciclohexano dependiendo de la afinidad preferencial de cada surfactante. Valores bajos de

HLB se solubilizan en aceite, valores altos de HLB en agua.

Para la superficie mineral en las mediciones de ángulo de contacto se emplearon las láminas de vidrio conocidas como cubre-objetos. Las láminas se trataron previamente con la solución de crudo diluido en tolueno por un tiempo de 2 horas, con el fin de obtener la alteración de su mojabilidad por adsorción de los componentes polares. En todo momento, las láminas fueron manipuladas por sus bordes de manera de no contaminar las superficies tratadas. Se utilizó propanol de compañía para el lavado de las láminas de vidrio y sec-butanol como alcohol de formulación.

3.2 Tratamiento de las placas de vidrio.

La medición del ángulo de contacto se realizó sobre superficies de vidrio (cubre-objetos de vidrio) con diferentes tratamientos. En el proceso de lavado se utilizó una solución jabonosa, seguido de la inmersión de las láminas de vidrio en propanol por 2 minutos. El secado se llevó a cabo en la estufa a 60°C. Una vez secas, el tratamiento de las placas consistió en la inmersión de las mismas en una solución de crudo diluido en tolueno de concentración 500 ppm en asfaltenos, por un tiempo de 2 horas en posición vertical. Transcurrido el tiempo, las láminas se lavaron en tolueno puro para separar el crudo en exceso y se secaron a temperatura ambiente, haciendo tocar uno de los bordes de la placa con papel absorbente para eliminar rápidamente el exceso de solución sobre las caras.

3.3 Soluciones al equilibrio de surfactante no-iónico

Se prepararon soluciones de surfactante de HLB creciente (barrido de HLB de 4.3 a 16.7) en agua o ciclohexano dependiendo de la solubilidad del mismo, con una concentración de 240 ppm. 30 mL de cada una de estas soluciones por separado fueron mezclados con la misma cantidad de una segunda fase (agua o ciclohexano según sea el caso) añadiéndose 3 ml de sec-butanol. Los sistemas se agitaron vigorosamente con la mano con el fin de asegurar el contacto completo entre las fases. Se dejaron en reposo y se esperó hasta alcanzarse el equilibrio en cada uno de ellos (aparición transparente y translúcida de ambas fases acuosa y oleica, rompimiento de la emulsión media formada). Al equilibrio todos los sistemas obtenidos presentaron comportamiento bifásico. Cada fase acuosa al equilibrio se empleó como la fase externa en la que fue sumergida la lámina de vidrio en las mediciones de ángulo de contacto.

3.4 Medición de tensión interfacial.

Se utilizó el tensiómetro de gota colgante Tracker de IT Concept, del laboratorio de Fluidos Complejos de la Universidad de Pau, Francia para la medición de la tensión interfacial en función del tiempo, entre la gota de crudo diluido en ciclohexano y la fase acuosa de cada uno de los sistemas equilibrados del barrido de HLB.

3.5 Medición del ángulo de contacto

Las láminas de vidrio tratadas con la solución de crudo se sumergieron en la fase acuosa al equilibrio de los diferentes sistemas del barrido de HLB. Se formó una gota de crudo en ciclohexano, de aproximadamente 1-3 mm³, bajo la lámina de vidrio inmersa en la solución equilibrada de surfactante, y se puso en contacto lentamente con el sustrato sólido con la ayuda de la aguja de la jeringa. Una vez formada la gota y en estado de reposo en contacto con la superficie de vidrio, se procedió a disminuir su volumen hasta que se observara el movimiento de la línea de contacto hacia dentro del área ocupada previamente por la gota. El ángulo reportado corresponde al ángulo de avance del agua. Se cuidó de producir el cambio de volumen de la gota muy lentamente, de manera de evitar la influencia de fuerzas viscosas sobre el ángulo de contacto. Se usaron velocidades de flujo menores de 0.2 mm³/min. Previo al contacto entre la superficie de vidrio tratada y la gota, ambos elementos se dejaron envejecer en la solución acuosa de surfactante por 5 minutos, tiempo suficiente para que la tensión interfacial se estabilizara de acuerdo a las medidas de tensión realizadas.

4 Resultados y Discusión

4.1 Mediciones de Tensión Interfacial

La Fig. 3 muestra la variación de tensión interfacial con el tiempo para gotas de solución de crudo en ciclohexano sumergidas en las diferentes fases acuosas de los sistemas equilibrados agua/ciclohexano/Tween-Span de HLB variable. Se observa en todos los casos la disminución de la tensión interfacial hasta alcanzar un valor casi constante para tiempos mayores a 200s. En las mediciones de ángulo de contacto, se estableció un tiempo de 250 s (4 min) para el envejecimiento de la gota con la solución acuosa previo a su colocación sobre la superficie de vidrio tratada, con el fin de asegurar una interfase estable y un valor de tensión interfacial constante.

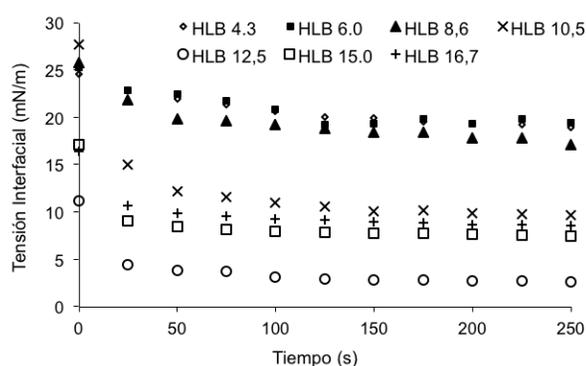


Fig. 3. Tensión Interfacial entre gota de solución crudo/ciclohexano y solución acuosa equilibrada de surfactante.

Los valores de tensión interfacial disminuyeron con el aumento del HLB, lo que puede explicarse a partir de la distribución o repartición de las moléculas de surfactante entre las fases agua y ciclohexano de los sistemas al equilibrio. La repartición de las moléculas entre las fases acuosa y oleica se debe al balance de su doble afinidad hidrofílica-lipofílica. Los valores altos de HLB corresponden a las moléculas de surfactante con una mayor afinidad por el agua, por lo que las soluciones acuosas provenientes de los sistemas equilibrados de HLB altos contenían una mayor cantidad de surfactante capaz de adsorberse a la nueva interfase gota oleica-solución acuosa y producir por lo tanto una tensión interfacial más baja.

4.2 Mediciones de ángulo de contacto

La medición del ángulo de avance (θ_A) de la fase acuosa de los diferentes sistemas equilibrados se midió sobre láminas de vidrio tratadas con una dilución de crudo en tolueno. Se trabajó con una solución de crudo en lugar de fracciones extraídas, ya que se ha demostrado que las fracciones de crudo que pueden adsorberse sobre superficies

minerales se comportan de manera diferente respecto al crudo de donde provienen. (Buckley *et al.*, 1997).

El ángulo de avance θ_A se midió justo antes de producirse el movimiento de la línea de contacto trifásico o el despegue de la gota de solución de crudo (lo primero que se observara). Se midió inicialmente θ_A sin la presencia de surfactantes, es decir, sustituyendo al fase acuosa por agua destilada, y se encontró un valor de θ_A igual a 85° . Este valor da cuenta de una superficie de mojabilidad intermedia, donde tanto el agua como el aceite se extienden parcialmente sobre ella. En términos de ángulo de contacto, se considera que para valores de $\theta < 90^\circ$ la superficie es hidrofílica, y para $\theta > 90^\circ$ la superficie es lipofílica. Cuando exhibe un ángulo igual a 90° se dice que su mojabilidad es intermedia, y prefiere por igual tanto al agua como al aceite. El valor de $\theta_A = 85^\circ$ para una superficie de vidrio evidencia que el tratamiento con la solución de crudo por 2h produjo la modificación de su mojabilidad, inicialmente hidrofílica, permitiendo la adsorción de los asfaltenos del crudo. La adsorción de asfaltenos podría considerarse como un tratamiento de hidrofobación del vidrio.

Para los casos con surfactante, la Fig. 4 muestra los valores de θ_A medidos desde la fase acuosa, en función del HLB del surfactante presente. El ángulo θ_A formado en la interfase gota/solución/sustrato para valores de HLB menores a 10.5 resultó siempre mayor a 90° , es decir, la superficie presentó una mojabilidad preferencial hacia el aceite. Por otro lado, para los valores de HLB superiores a 10.5 no fue posible la adherencia de la gota a la superficie, por lo que técnicamente se estaría hablando de un ángulo de avance de 0° para el agua (superficie hidrofílica).

La presencia del surfactante más lipofílico (HLB 4.3 y 6) produjo un aumento inicial del valor θ_A , aumentando la lipoficidad de la superficie. La transición de la mojabilidad de lipofílica a hidrofílica se evidenció gradualmente a medida que el valor de HLB de los surfactantes presentes aumentaba por encima de 6 hasta un valor cercano a HLB 12, valor para el que el sistema ciclohexano / agua / secbutanol / NPE exhibe el mínimo de tensión de interfacial, correspondiente a su formulación óptima.

Experimentalmente se observó que a medida que aumentaba el HLB de la fase acuosa la adherencia de la gota se hacía más difícil. Fue necesario inyectar más volumen a la gota para ejercer una ligera presión sobre la superficie de la lámina y obtener finalmente la adhesión de la gota a la placa. En los casos en que esto fue necesario, el valor de ángulo se midió una vez adherida la gota reportándose el valor como se explicó anteriormente.

En vista de la dificultad de adhesión de la gota una vez transcurridos los cinco minutos de equilibración, se probó con una gota recién formada, es decir, sin dejarla equilibrar con la fase acuosa. Para valores intermedios de HLB la gota lograba adherirse más fácilmente que aquella en las mismas condiciones con los cinco minutos de contacto.

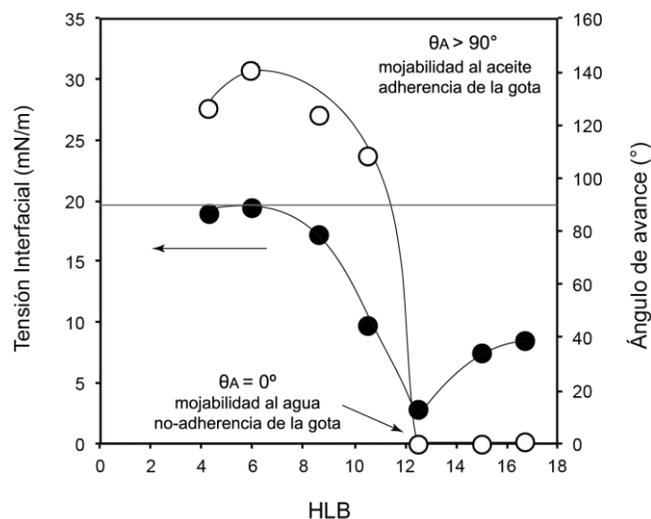


Fig. 4. Variación del ángulo de contacto y de la tensión interfacial en los sistemas solución de crudo/solución de surfactante/vidrio tratado, en función del HLB del surfactante de la solución acuosa equilibrada

La dificultad de adhesión aumentó al aumentar el HLB del surfactante de la solución, llegando a no haber diferencia entre una gota envejecida y una gota solución para valores de HLB superiores a 12.5, en los que no se produjo la adherencia de la gota.

El fenómeno de adsorción para el caso de los surfactantes menos hidrofílicos puede explicarse si se considera la presencia de moléculas de surfactante adsorbidas por sus cabezas ligeramente polares hacia la superficie cubierta de asfaltenos y sus colas hacia la solución. La aproximación de una gota de aceite en la que las moléculas de surfactante adsorbidas tienen su cabeza polar hacia la solución no causará repulsión electrostática por lo que es posible la adherencia de la gota a la superficie.

En el caso de los surfactantes con un HLB superior a 10.5 la adhesión de la gota de solución crudo/ciclohexano no se produjo “espontáneamente”, sino que fue necesario ejercer cierta presión, llamada en estos casos presión de disyunción, para lograr una parcial adherencia gota-sustrato. En estos sistemas, el surfactante es netamente más hidrofílico con cabezas polares más grandes, y es posible que a nivel de las interfases crudo/fase-acuosa y vidrio/fase-acuosa, las moléculas anfífilas ejerzan repulsiones estéricas que impiden el contacto crudo-vidrio.

4.3 Relación entre la tensión interfacial y el ángulo de avance de la fase acuosa.

Los valores de tensión interfacial y ángulo de avance siguen el mismo comportamiento. En la fig. 4 se observa la disminución de ambos parámetros a medida que aumenta el HLB del surfactante hasta un valor igual a 12. Para este valor de HLB, la tensión alcanza su mínimo

correspondiente a la formulación óptima del sistema, mientras que el ángulo de contacto se hace igual a 0° , mostrando bruscamente la transición de la mojabilidad de la superficie de lipofílica a hidrofílica.

Resultados similares en sistemas acrílico/salmuera/n-dodecano fueron encontrados por Serrano-Saldaña y col., (2004), donde la tensión del sistema disminuye con la concentración de SDS (dodecil sulfato de sodio) al mismo tiempo que lo hace el ángulo de avance de una gota de salmuera depositada sobre la superficie sólida. La transición de la mojabilidad también se da desde condiciones lipofílicas a superficies hidrofílicas con embargo, $\theta_A < 90^\circ$. Sin embargo, no se alcanzó la hidrofílicidad total de la superficie ($\theta_A = 0^\circ$) debido a los valores de tensión interfacial. Se presume que en nuestro caso, la condición de formulación óptima que se tiene para $HLB = 12$ (tensión interfacial mínima) está relacionada con la mojabilidad total hacia el agua.

Por otro lado, los resultados de la capacidad de adsorción de la gota de aceite sobre la superficie muestran también una relación directa con la tensión interfacial. A valores altos de tensión, la gota de crudo diluido tiene mayor capacidad de adsorberse, mientras que a medida que la tensión disminuye, la capacidad de adsorción de la gota disminuye, encontrándose incluso que la gota no se adhirió para valores mínimos de tensión, deslizándose limpiamente a lo largo de la superficie. Carroll (1996), quien estudió el despegue de gotas de aceite de superficies de poliéster en función de la concentración de SDS, encontró resultados equivalentes. En su caso, la naturaleza del surfactante no cambió, el ángulo de contacto permaneció constante para las tres concentraciones de surfactante empleada, y sus resultados mostraron que la facilidad de despegue de la gota aumentaba al disminuir la tensión interfacial (al aumentar la concentración del surfactante por debajo de la CMC).

Los resultados de nuestra investigación muestran que en condiciones cercanas y en la formulación óptima (tensión interfacial mínima) del sistema ciclohexano / agua / secbutanol / nonilfenoletoxilado, la mojabilidad de la superficie de vidrio cambia bruscamente, impidiendo que la gota de crudo se adhiera. Estos resultados complementan y aportan a entender mejor las características particulares de las condiciones de formulación óptima tan deseadas a la hora de efectuar la recuperación mejorada de crudo.

5 Conclusiones

La presencia de moléculas de surfactante capaces de adsorberse sobre interfase líquido-líquido y sólido-líquido modifican las interacciones entre ellas, alterando el ángulo de contacto con que estas interfases entran en contacto. La variación progresiva del balance hidrofílico-lipofílico de los surfactantes no iónicos TWEEN-SPAN hacia mayor hidrofílicidad produjo una superficie cada vez más hidrofílica. En comparación con las mezclas surfactantes empleadas en los lodos de perforación de tipo W/O, que

dejan la superficie de la roca con una mojabilidad preferencial al aceite (Skalli 2006), los surfactantes empleados en este estudio evitaron la adhesión de una gota de solución de crudo sobre la superficie mineral para los valores más altos de HLB. Se encontró una relación directa entre ángulo de contacto y tensión interfacial, donde una tensión mínima, correspondiente a la formulación óptima en los procesos de recuperación mejorada de petróleo (EOR), generó una superficie totalmente mojabla al agua con $\theta_A = 0^\circ$, en la que no fue posible la adherencia de la gota de crudo. Estos resultados podrían apoyar la evidencias experimentales de la mejor recuperación del crudo en las condiciones óptimas de la EOR.

Referencias

- Benner EC, Bartell EE, 1941, The Effect of Polar Impurities Upon Capillary and Surface Phenomena in Petroleum Production, Drilling and Production Practice, API pp. 341-348.
- Buckley JS, Liu Y, 1998, Some mechanisms of crude oil/brine/solid interactions, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 20, pp. 155-160.
- Buckley J, Liu Y, Xie X, Morrow N, 1997, Asphaltenes and crude oil wetting_the effect of oil composition. SPE J, Vol. 2, pp. 107-119.
- Carroll BJ, 1996, The Direct Study of Oily Soils Removal from Solid Substrates in Detergency, *Colloids Surf. A*, pp. 114-161.
- Czarnecka E, Gillott JE, 1980, Formation and Characterization of Clay Complexes with Bitumen from Athabasca Oil Sand, Clay and Clay Minerals Vol. 28, No.3, pp. 197- 203.
- Freer E, Svitova T, Radke C, 2003, The role of interfacial rheology in reservoir mixed wettability, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 39, pp. 137-158.
- Ghannam M, 2003, Spreading behavior of crude oil over limestone substrate, Journal of Colloid and Interface Science Vol. 262, pp. 435-441.
- Gloton MP, 1992, Study of Asphaltenes Adsorption on Mineral Surfaces By Contact Angle Measurements: Kinetics of Wettability Changes, Physical Chemistry of Colloids and Interfaces in Oil Production, H. Toulhoat y J. Lecourtier (eds.), Paris, pp. 89-96.
- Griffin WC, 1949, Hydrophilic-lipophilic balance, J. Soc. Cosmet. Chem., Vol. 1, pp. 311-326.
- Griffin WC, 1954, Calculation of HLB values of non-ionic surfactants. J. Soc. Cosmet. Chem., Vol. 5, pp. 249-256.
- Liu Y, Buckley J, 1997, Evolution of Wetting Alteration by Adsorption From Crude Oil, Society of Petroleum Engineers SPE Evaluation of Formation. Marzo, pp.5-11.
- Rondón M, Bouriat P, Lachaise J, 2006, Breaking of Water-in-Crude Oil Emulsions. 1. Physicochemical Phenomenology of Demulsifier Action, Energy & Fuels, Vol. 20, pp. 1600-1604.

Salathiel RA, 1973, Oil recovery by surface film drainage in mixed-wettability rocks, Journal of Petroleum Technology, Vol. 25, pp. 1216–1224.

Serrano E, Domínguez A, Pérez H, Kornhauser I, Rojas F, 2004, Wettability of solid/brine/n-decane systems: experimental study of the effects of ionic strength and surfactant concentration, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, Vol. 241, 343-349.

Skalli L, Buckley JS, Zhang Y, Morrow NR, 2006, Surface and core wetting effects of surfactants in oil-based drilling fluids, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 52, pp. 253–260.

Starkweather B, Zhang X, Counce R, 2000, An Experimental Study of the Change in the Contact Angle of an Oil on a Solid Surface, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 39 pp. 362-366.

Tolosa, Laura: Ingeniero Químico, profesora de Química Analítica en la Universidad de Los Andes. Investigadora del Laboratorio de Fenómenos Interfaciales, Reología y Procesos.

Bouriat, Patrick: Ph.D. Investigador del Laboratorio de Fluidos Complejos de la Universidad de Pau en el área de interfases líquida-líquida y Reología interfacial. Correo electrónico:patrick.bouriat@univ-pau.fr

Rondón, Miguel: Ph.D. en Ciencias Aplicadas. Siguió estudios post-doctorales en la Universidad de Kansas y trabaja en Química de Producción en el Icp-Bucaramanga. Correo electrónico:m_rondon@yahoo.com

Salager, Jean-Louis: Ph.D. en Ingeniería Química, Director-Fundador y profesor emérito de la Escuela de Ingeniería Química y del Laboratorio FIRP de la Universidad de Los Andes. Correo electrónico:salager@ula.ve

Lachaise, Jean: Ph.D. y profesor emérito del Departamento de Física del Laboratorio de Fluidos Complejos de la Universidad de Pau y los Países de l'Adour, Francia. Correo electrónico: jean.lachaise@univ-pau.fr

Capítulo 95

Caracterización de coques de petróleo por molienda mecánica

Tolosa, Ramón*; **Biceño, Richard**; **Graterol, Luis**; **Araque Marco**
Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica
Mérida-Venezuela
*tolosa@ula.ve

Resumen

Se realizó la caracterización microestructural de cuatro tipos de coques provenientes de los procesos de refinación del petróleo venezolano (grado combustible, de lecho, lajado y calcinado), mediante técnicas de la metalurgia de polvos (pulvi-metalurgia). Las muestras se trituraron antes de la molienda, luego se determinó la densidad aparente y se realizó el tamizado del material, para seleccionar de cada coque la fracción del material más adecuada para el estudio. La molienda mecánica fue realizada con un molino de bolas de elevada energía tipo Attritor, bajo diferentes condiciones experimentales de velocidad, tiempo y relación peso de bolas a polvo (RBP). Las muestras de cada condición de molienda se observaron mediante microscopía electrónica de barrido, obteniéndose micrografías que se estudiaron en un equipo de análisis digital de imágenes, evaluándose la forma, el tamaño (diámetro equivalente proyectado) y el parámetro característico del alargamiento la longitud de cuerda máxima. Se determinó que la densidad aparente promedio varía en el intervalo (0,71 - 0,99)g/cm³ en dependencia del tipo de coque. La distribución del tamaño de partícula por el tamizado fue diferente en cada coque para idénticas condiciones experimentales, no obstante la mayor concentración de las partículas se ubica en el intervalo (150 a 425) μm. En general al aumentar los valores de los parámetros de la molienda mayor fue la disminución del tamaño de las partículas; sin embargo, dependiendo del tipo de coque y condición de molienda algunos parámetros fueron más influyentes que otros, pero de manera distinta en cuanto a los cambios de la forma de las partículas. No se obtuvieron resultados numéricos al evaluar la fluidez y empaquetamiento de las partículas de los polvos debido a sus tamaños y diferentes características físicas superficiales.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

La refinación del petróleo produce coque como un subproducto o residuo, es un material de poco valor comercial porque tiene sustancias contaminantes, tales como azufre y otros elementos químicos. Esto produce inconvenientes, ya que por estar depositado al aire libre el viento arrastra polvillo que causa problemas de salud en los trabajadores petroleros, en las comunidades vecinas a las refineras, y también deterioro del ambiente particularmente donde existen sembradíos agrícolas.

Venezuela en general produce un promedio de 20750 toneladas métricas diarias (tmd) de coque, siendo poco lo consumido internamente como también lo que se vende por exportación, 0,6% y 1,2% respectivamente (MPPPM, 2014; Guerrero y Maingon, 2013); esa cantidad impresionante a futuro se incrementará por las refineras previstas construir en la Faja Petrolífera del Orinoco, por lo que serán más críticos los problemas a resolver si no se emprenden acciones correctivas que eliminen o minimicen esta situación. En este sentido desde el año 2012 el Ministerio del Poder Popular para la Ciencia, Tecnología e Innovación (MPPCTI) ha establecido como área prioritaria de investigación y desarrollo todo lo relacionado con el uso del coque de petróleo (CP), entre otras áreas (MPPCTI 2012).

Son numerosas las investigaciones que a lo largo del tiempo se han realizado sobre el CP, principalmente las relacionadas con su obtención y caracterización, en menor cuantía las relacionadas con su uso, siendo las industrias del cemento, generación de energía eléctrica y la siderúrgica quienes mayormente lo utilizan en primera instancia; luego, al ser tratado térmicamente se convierte en coque calcinado (CC) quien posee menos sustancias contaminantes pudiendo ser usado en la fabricación de ánodos para la industria del aluminio, producción de titanio a partir del óxido de titanio, monóxido de carbono para la producción de materiales plásticos, y en la producción de aceros especiales (Santos y col. 2008).

Un uso importante del CP es transformarlo en grafito, generalmente en forma de polvo, y mediante las tecnologías de la metalurgia de polvos (pulvimetalurgia) y/o cerámica clásica fabricar diferentes productos industriales por ejemplo: minas para lápices, escobillas para motores eléctricos (carbones), frotadores para trolebuses, crisoles y vasos para fundición, moldes, bujes, elementos calentadores, empaques y sellos, tornillería mecánica especial, fibra de carbono, y otros más. En Venezuela se importa en promedio 9 mil toneladas anuales de grafito, con un costo promedio de 35 millones de dólares en los últimos 5 años (INE, 2015), esto debido a que no existen minas de grafito natural en explotación ni se produce localmente por alguna tecnología.

Existen tecnologías probadas y operativas a nivel internacional que permiten transformar el CP en grafito, mediante la combinación de operaciones mecánicas, tratamientos térmicos o termoquímicos, que permiten acondicionar y

procesar adecuadamente el CP para su transformación a grafito, siendo una de las etapas de esta transformación la calcinación (carbonización) del coque y finalmente la grafitización. Localmente PDVSA-Intevep ha realizado algunas investigaciones básicas con el CP venezolano demostrando que es posible obtener grafito (D'Elia y col., 2015), paralelamente y de acuerdo a la secuencia de los procesos para la transformación se realizó un estudio de la molienda del CP que es la primera operación mecánica a la cual este material es sometido (Graterol y Araque, 2014). Actualmente cursa en el Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACIT) para la evaluación financiera un proyecto sobre la conversión del CP en grafito el cual ya fue revisado y aprobado por el Centro Nacional de Tecnologías Químicas (CNTQ) ente adscrito al MPPCTI (Tolosa y col., 2016). El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar la influencia de la molienda mecánica sobre cuatro tipos de CP producidos en el país.

2 Marco Teórico

2.1 Molienda mecánica

Para el tratamiento industrial de rocas y minerales o equivalentes, es necesario practicar la preparación de los mismos siendo común realizar la reducción de sus tamaños por medios físicos como la trituración y la molienda. Si bien no existe una diferencia clara entre la trituración y la molienda, en general se habla de trituración cuando se fragmentan objetos de tamaños superiores a 1 pulgada (Waganoff 1956). En las refineras el CP es sometido a trituración para luego ser colocado en los patios de almacenamiento, mientras que la molienda se emplea a posteriori en estudios y/o procesamientos particulares.

La molienda es la última etapa del proceso de fragmentación para la reducción del tamaño de las partículas del polvo, involucra fuerzas de impacto sobre el material mediante el uso de molinos de bolas duras, o cualquier otro cuerpo moledor en dependencia del molino utilizado; determinando que estos se clasifiquen en dos grupos, de baja y elevada energía. Este proceso es dependiente de varios parámetros siendo los más importantes: el tipo de molino, contenedor del molino, velocidad de rotación, tiempo de molienda, medios moledores (tipo, tamaño, distribución), relación peso de bolas a peso de polvo (RBP), extensión de llenado del contenedor, atmosfera, agente de control y temperatura de la molienda (Suryanarayana 2001).

Se han realizado diversas investigaciones sobre la molienda del CP con enfoques particulares en cada caso, en dependencia del uso que se pretende hacer del coque (Uchiyama 1997; Guzmán y col., 2006; Guzmán 2008; Wiratmoko y col., 2009).

3 Procedimiento experimental

3.1 Materiales

Se estudiaron los coques: grado combustible (CGC), de lecho (CLe), lajado (CLa) y calcinado (CC). Los tres primeros son coques denominados verdes obtenidos por el proceso de refinación de acuerdo a determinadas condiciones operacionales (Villasana 2012), producidos en el Complejo Refinador de Paraguana, Estado Falcón, Venezuela; y el último es un coque verde producido en el Complejo Refinador “José Antonio Anzoátegui” Estado Anzoátegui, Venezuela, que fue tratado térmicamente por calentamiento a temperaturas superiores a los 1200 °C (calcinación), en la empresa Carbones del Orinoco (CVG-Carbonorca) en Puerto Ordaz, Estado Bolívar, Venezuela.

Las muestras presentaron distintas formas así como una distribución irregular de sus tamaños (Fig. 1), debido a la aglomeración de los polvos finos conformando cuerpos petrificados. Debido a esto y para adecuar el tamaño del material para la molienda se realizó la trituración del mismo, determinando que la mejor condición fue con una separación de 0,61 mm entre las mordazas del triturador. Posteriormente el material fue secado en una estufa a 80 °C durante una hora por presentar cierto grado de humedad.

3.2 Molienda mecánica

Se utilizó un molino de bolas de elevada energía tipo Atritor marca UnionProcess, modelo HD01, con sistema de control programable (SP600 LCD OIM), bolas de acero templado de 5 mm de diámetro y contenedor de acero inoxidable de 750 ml. Mediante un diseño experimental factorial 2^3 se seleccionaron los parámetros de la molienda: RBP 10:1 y 20:1; velocidad de rotación (VR) 250 y 500 rpm; tiempos de molienda (t) 3 y 6 horas, para un total de 32 condiciones experimentales distintas. Se agregó 1% en peso de ácido esteárico como agente de control bajo una atmósfera de argón. La temperatura fue de 22 ± 2 °C regulada mediante el flujo de agua que circula alrededor del contenedor dentro del molino. Para los estudios de caracterización se seleccionaron al azar 4 muestras de polvo de cada una de las condiciones de molienda, resultando 128 muestras analizadas.

3.3 Densidad aparente

Se determinó la densidad aparente (DA) de los polvos obtenidos por la molienda de acuerdo a la norma MPIF 04 (ASTM B 212) empleando el aparato Flujómetro de Hall.

3.4 Tamizado

El tamizado de los polvos se realizó de acuerdo a la Norma MPIF 05 (ASTM B 214) utilizando una tamizadora vibratoria excéntrica marca W.S Tyler modelo RX-812. Se

emplearon los tamices números: 40, 60, 100, 120, 200 y 325. De acuerdo a las DA las muestras analizadas tuvieron un peso de 60 g. cada una.

3.5 Análisis microscópico

Se realizó el estudio microscópico de los polvos mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), utilizando un equipo marca Hitachi, modelo S-2500. Se observaron y fotografiaron las partículas del polvo a los aumentos 200x, 700x, 2500x y 4000x, para un total de 128 fotografías (32 por cada CP). Se evaluaron las imágenes seleccionando las de 2500x como más adecuadas para el estudio cuantitativo mediante análisis digital de imágenes, para esto se empleó un equipo marca Leco modelo IA-3001. Las partículas de los polvos de CP se caracterizaron mediante la determinación de los parámetros: diámetro equivalente proyectado (DEP), longitud de cuerda máxima (LCmx) y la forma que poseen; esto de acuerdo a los principios de caracterización de partículas (German 1994).

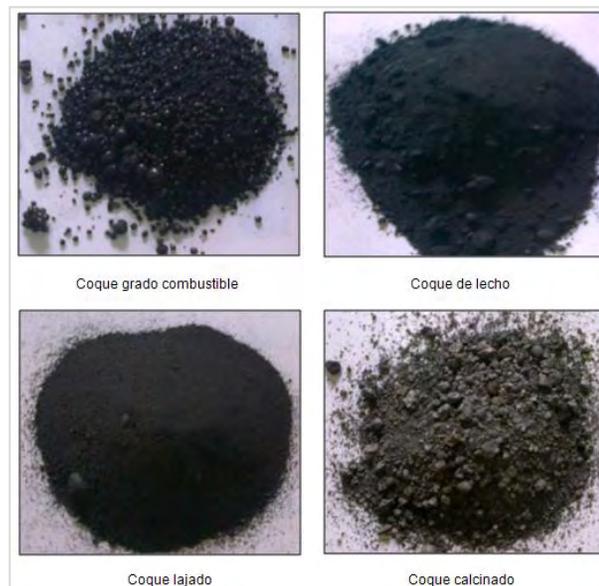


Fig. 1 Aspecto visual de los cuatro CP estudiados

4 Resultados y discusión

La tabla 1 muestra los valores promedio de la densidad aparente de los CP.

Tabla 1. Densidad aparente promedio de los CP

CP	CGC	CLe	CLa	CC
DA (g/cm ³)	0,71±0.0	0,92±0,0	0,87±0.0	0,99±0,0
	1	1	1	2

Como se observa, la DA varía en el intervalo (0,71-0,99) g/cm³, siendo el CGC quien posee el menor valor mientras que el CC el mayor; en este último caso era de esperar que su densidad fuese la mayor debido a que el tratamiento de calcinación a elevada temperatura produce por una parte eliminación de sustancias volátiles y contaminantes así como cambios internos estructurales asociados a las primeras etapas del proceso de grafitización que producen contracción (Kakuta y col., 1981; Frohsa y col., 2015). En los otros CP por ser coques verdes es característica en ellos la presencia de poros de formas y tamaños diferentes, y la cantidad volumétrica en masa (% porosidad), lo que determina que sus DA sean menores que la del CC. Los coques CLe y CLa tienen valores cercanos, con una diferencia promedio de 0,05 g/cm³, lo cual se explica por el hecho que el CLa se obtiene por una variante en la producción del CLe denominada flexicoquización (Sánchez, 2011). El CGC presenta el menor valor de DA lo cual se atribuye a una elevada porosidad presente en este coque.

La Tabla 2 muestra los resultados del tamizado de los polvos en base porcentual y la Fig. 2 su comportamiento gráfico.

Tabla 2. Porcentaje promedio de masa retenida en tamices

Tamaño (µm)	CGC	CLe	CLa	CC
425	57,77	7,64	2,62	46,93
250	32,92	68,60	12,24	23,04
150	7,52	20,59	48,25	19,80
125	1,79	0,94	11,69	6,87
75	0	1,67	20,60	3,36
45	0	0,39	4,26	0
<45	0	0,17	0,34	0

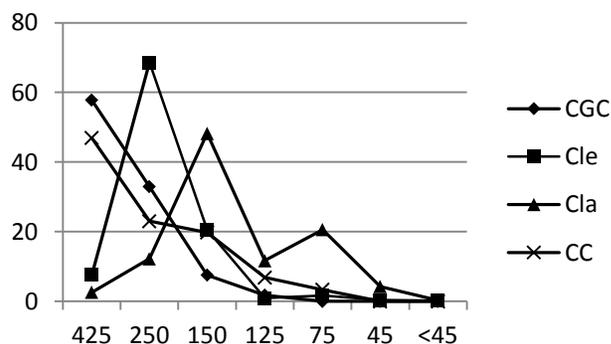


Fig. 2. Comparación gráfica del tamizado de los CP

En general no se observa una tendencia única o común entre todos los CP, lo que evidencia la influencia de sus cualidades físicas (tamaño y forma). Los coques CGC y CC son los más parecidos en comportamiento, sus tamaños descienden uniformemente siendo más notorio en el CGC. Los coques CLe y CLa son los únicos que presentan material retenido en todos los tamices, con cantidades diferentes

en cada uno de estos, siendo la mayor concentración en el intervalo de (150-250) µm, mientras que para los coques CCG y CC entre (250-425) µm; en conjunto los CP presentan la mayor concentración de sus partículas en el rango (150-425) µm. En este intervalo el CCG posee la mayor cantidad en masa de polvo seguido de CLe luego el CC y último el CLa.

La Fig. 3 muestra imágenes representativas de los CP estudiados a diferentes aumentos, y de acuerdo a la codificación experimental establecida. La Fig. 4 muestra a manera de ejemplo el resultado de la determinación del DEP (MEAS1) mediante el análisis digital de imágenes de una muestra de CGC; como se observa se obtienen los valores: media, desviación estándar, máximo y mínimo. De manera equivalente al DEP se determinó LCMx (MEAS2) como se observa en la Fig. 5 para la misma muestra de CP.

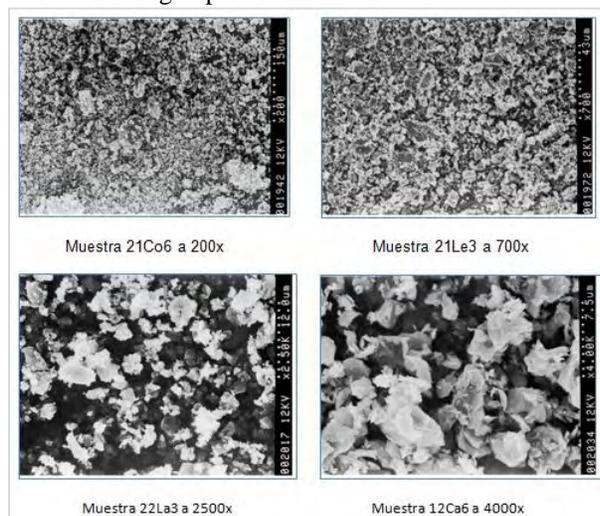


Fig. 3. Fotomicrografías por MEB de los polvos de CP, muestras: 21Co6 de CGC, 21La3 de CLe, 22La3 de CLa y 12Ca6 de CC.

SAMPLE	TAG	FIELD	Length	Stat	
11CO3	MEAS1	1	4,7418	N/A	
		1	3,7435	N/A	
		1	6,9611	N/A	
		1	3,9460	N/A	
		1	3,2540	N/A	
		1	3,1568	N/A	
		1	4,8167	N/A	
	CALC1	PostSample		4,3743	Average
		PostSample		1,2154	Std Dev
		PostSample		3,1568	Minimum
PostSample		6,9611	Maximum		

Fig. 4. Ejemplo del resultado del análisis digital de imágenes en la determinación de DEP.

La Tabla 3 muestra los resultados promedios de los parámetros DEP y LCMx para todos los CP. Se incluye la diferencia (DIF) entre estos dos valores lineales, aunque su definición y determinación son diferentes, porque son mediciones geométricas en el plano que caracterizan cada partícula, pudiéndose en algunas circunstancias inferir aspectos de la forma al evaluar las imágenes (redondez, alargamiento)

to, otros), de hecho hay casos donde es posible establecer relaciones (índices) entre el tamaño y la forma (ASM 1984, German 1994).

SAMPLE	TAG	FIELD	Length	Stat
11CO3	MEAS2	1	3,6296	N/A
		1	4,9664	N/A
		1	2,8329	N/A
		1	3,5614	N/A
		1	3,1137	N/A
	CALC2	PostSample	3,4158	Average
		PostSample	0,8116	Std Dev
		PostSample	2,3911	Minimum
		PostSample	4,9664	Maximum

Fig. 5. Ejemplo del resultado del análisis digital de imágenes en la determinación de LCmx.

Tabla 3. Valores promedio de DEP (µm) y LCmx (µm).

CP	CGC	CLe	CLa	CC
DEP	3,2933	2,7096	2,3268	2,1024
LCmx	3,2993	2,9307	2,3326	2,3926
DIF	0,006	0,2211	0,0058	0,2902

Al evaluar en conjunto todos los resultados mostrados en figuras y tablas se determinaron para los CP varios comportamientos, considerando por separado cada uno de los parámetros de la molienda (RBP, VR, t). En todos los casos se observa la forma que tienen las partículas de los polvos comparándolas con patrones geométricos preestablecidos (descriptores cualitativos); basados en esto se establece el criterio que en caso de partículas que posean forma igual o similar a la de una circunferencia, los valores a utilizar para realizar el análisis serán los promedios DEP, mientras que en caso de ser alargadas los promedios de LCmx.

Primeramente, de manera general se evidenció que el incremento de los valores de los parámetros de la molienda produjo la reducción del tamaño de las partículas y cambios en la forma, debido al aumento de la energía transferida al material por las elevadas velocidades, así como también el mayor número de colisiones por la cantidad de elementos moledores y el incremento del tiempo de molienda. Para el CGC el parámetro que más influyó fue la RPB 20:1; sin embargo, el parámetro que mostro mayor diferencia en cuanto al cambio de forma fue la velocidad de molienda, observándose reducción de las estructuras alargadas (comunes a bajas velocidades) además de la eliminación de algunas grietas superficiales en partículas de gran tamaño, lo más probable que fracturaron separándose en partes quedando otras que no presentaron esta situación. En el caso del CLe el parámetro que produjo la mayor reducción del tamaño y además causó la mayor influencia en el cambio de las estructuras alargadas, fue el elevado tiempo de molienda. Para los coques CLa y CC ocurrió de manera similar al caso del CLe; sin embargo, en el CC la modificación de la

estructura alargada el tiempo jugó un papel importante sólo cuando se realiza a elevada velocidad.

Considerando las diferencias DIF, en general las magnitudes no son elevadas, se encuentra que tanto el CGC y CLa poseen los menores valores, casi que nulos, lo que en principio pudiese interpretarse como si las partículas se han redondeado; sin embargo, la observación global de estos polvos no lo confirma mayoritariamente. La mayor diferencia la posee el CC seguido del CLe, indicativo de la existencia de partículas tanto alargadas como redondeadas, lo cual se evidenció en las observaciones microscópicas.

Adicional a lo antes tratado, como información no menos importante para tener en cuenta, fue el hecho que se pretendió evaluar la fricción entre las partículas de los CP luego de la molienda, mediante el Flujómetro de Hall, para determinar sus cualidades de fluidez y empaquetamiento, resultando que no fluyeron libremente tal como lo establece la norma, por lo que en situaciones de manipulación (transporte por tubería, envasado u otros similares) será necesario auxiliarse de medios mecánicos o neumáticos para lograrlo.

5 Conclusiones

El tipo de CP, derivado de la técnica de refinación utilizada, determina diferentes resultados en la molienda mecánica.

El incremento de los parámetros de la molienda: RBP, VR y t, en general producen la disminución del tamaño de las partículas de los CP, siendo más notorio y uniforme en el CGC y CC; igualmente ocurren cambios de la forma de las partículas del polvo, las estructuras alargadas observadas a bajas VR algunas se rompen y separan en partes otras se redondean.

Los cambios microestructurales (tamaño y forma) en el CGC dependen principalmente de elevar la RBP y VR.

En los coques CLe y CLa el principal parámetro influyente fue tiempo de molienda (t).

En el CC tanto el tiempo y la elevada velocidad en la molienda fueron los parámetros más influyentes.

La diferencia (DIF) entre el DEP y LCmx no permite acertadamente inferir las modificaciones geométricas de las partículas.

Para lograr la manipulación adecuada de los polvos de los CP producidos por molienda mecánica se deben emplear medios mecánicos y/o neumáticos, debido a sus tamaños y diferentes características físicas superficiales.

Agradecimientos

Al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico, Tecnológico y de las Artes (CDCHTA), de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, por el financiamiento del proyecto I-887-05-02-A para adquirir el molino.

A la Ing. Marcela Miranda del MPPPM por gestionar la donación de CP del CRP.

A la Ing Gloria Basanta del IIMM-SIDOR por la donación del CPC de CVG-Carbonorca.

Al Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela; por su colaboración en las etapas de trituración y tamizado.

Al Centro de Microscopía Electrónica (CME) de la Universidad de Los Andes, Facultad de Medicina, Mérida, Venezuela; por su colaboración en la realización de los estudios de microscopía electrónica.

Referencias

- ASM 1984, Metals Handbook, Vol. 7, Powder Metallurgy. Metals Park, Ohio, USA.
- D'Elia L, Cañizales E, Delgado B, Kubota M, 2015, A assesment on the morphological and ultrastructure changes boosted during graphitisation of venezuelan delayed pet-coke. Acta Microscopica, Vol. 24 Supp. A.
- Frohsa W, Roeßner F, 2015, Expansion of carbon artifacts during graphitization - An industrial issue, Tanso N° 267, pp. 77-83
- German R, 1994, Powder metallurgy science, MPFI, Princeton, New Jersey USA.
- Graterol L, Araque M, 2014, Caracterización microestructural de polvos de coques procesados por molienda mecánica, Proyecto de Grado Ing. Mecánico, Universidad de Los Andes. Mérida Venezuela.
- Guerrero A, Maingon A, 2013, Valoración de la factibilidad técnica económica y financiera para el desarrollo de una planta de generación de electricidad utilizando coque de petróleo, ubicada en Venezuela, UCAB, Caracas Venezuela.
- Guzman S, 2008, Estudio de la influencia del proceso de molienda de alta energía en derivados carbonosos: propiedades, optimización y aplicaciones. Tesis Doctoral UCIII, Madrid, España.
- Guzmán S, Rabanal M, Velasco F, Torralba J, Jiménez J, 2006, Influencia de las condiciones de molienda mecánica en diferentes tipos de coques de petróleo, Bol. Soc. Esp. Ceram. V 45 [5] 314-320
- INE, 2015, Sistema de consultas estadísticas de comercio exterior, http://www.ine.gov.ve/index.php?option=com_content&view=category&id=48&Itemid=33
- Kakuta M, Kohriki M, Ohmoto Y, 1981, Structural Changes during Calcination of Petroleum Coke (Part 2), Tanso N° 106, pp. 102-105
- MPPCTI, 2012, Convocatoria a proyectos de investigación e innovación 2012, <http://conciencia.mcti.gob.ve>
- MPPPM, 2014, Petróleo y otros datos estadísticos (PODE) 2012, <http://www.menpet.gob.ve/secciones.php?option=view&idS=21>
- Sánchez L, 2011, Desarrollo de un método eficiente de tratamiento químico del petrocoque para su reutilización, Tesis Doctoral LUZ, Zulia, Venezuela.
- Santos A, Silva R, 2008, Análisis del consumo de coque de petróleo en algunos sectores industriales, Información Tecnológica, Vol. 19(2), 93-101.
- Suryanarayana C, 2001, Mechanical alloying and milling, Progress in Materials Science, Vol 46, pp 1-184
- Tolosa R, D'Elia L, Requena A, Urbina R, Salas K, García G, Pernía L, Córdova A, Henríquez M, 2016, Obtención de grafito a partir de coque retardado de petróleo producido en el Complejo "José Antonio Anzoátegui" y estudio de sus posibles aplicaciones en el mercado nacional. En trámite.
- Uchiyama Y, Araki S, Cheng H, Kobayashi K, 1997, Effects of grinding and addition of MoSi₂ or LaB₆ on structural change of petroleum coke and electrical resistivity of the sintered compacts, Tanso N° 176, pp 14-19
- Villasana L, 2012, Modelo de la unidad de coquización retardada de la refinería de Amuay modo de operación grado ánodo. Tesis Ing. Químico USB, Caracas Venezuela.
- Waganoff N, 1956, Trituración, molienda y separación de minerales, Editorial Alsina, Buenos Aires Argentina.
- Wiratmoko A, Halloran J, 2009, Fabricated carbon from minimally processed coke and coal tar pitch as a carbon-sequestering construction material, J Mater Sci, publicado online.

Tolosa Ramón: Ing Mecánico, ULA, Venezuela, MSc. en Ciencia de Los Materiales, UCV, Venezuela, Prof. Titular de la Escuela de Ing Mecánica, ULA, Mérida, Venezuela.

Briceño Richard: T.S.U. en Metalurgia y Siderurgia, Auxiliar Docente, Escuela de Ing Mecánica, ULA. Mérida, Venezuela. Correo electrónico: briceno@ula.ve

Graterol Luis: Ingeniero Mecánico, ULA, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: tolosa@ula.ve

Araque Marco: Ingeniero Mecánico, ULA, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: tolosa@ula.ve

Modelo del proceso de producción de hielo en un evaporador inundado

Jinete, María Elena*; **Ávila, Manuel Vicente****

Escuela de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela

*maria.e.jinete@gmail.com

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo y validación de un modelo matemático del proceso de formación de hielo dentro de un tubo con flujo de agua interno, sumergido en un medio refrigerante. El modelo, considerando la transferencia de calor en la dirección radial, relaciona las variables del proceso como son dimensiones de la tubería, tiempo de congelación, espesor de hielo y variables termodinámicas del refrigerante. Se presenta una solución analítica para un modelo simplificado y una solución numérica para el caso general. Los resultados, usando el refrigerante R-22, sugieren para aumentar la producción, mejorar la recirculación del agua de producción de hielo para disminuir su temperatura, disminuir la temperatura del refrigerante y mantener en régimen laminar las condiciones del agua en las tuberías. Se comparan con datos obtenidos de evaporadores de fábricas de hielo.

ISBN: 978-980-11-1858-9



1 Introducción

LasEl problema de transferencia de calor asociado con el cambio de fase ha sido estudiado extensamente debido a su frecuente aparición en procesos industriales tales como: almacenamiento de energía térmica, crecimiento de cristales, fusión de electrodos, moldeado de plástico y producción de hielo (Hu y col., 1996). Durante el cambio de fase el calor específico de una sustancia se incrementa más de cien veces, así la capacidad de almacenamiento térmico de la sustancia aumenta considerablemente permitiendo que almacene un gran monto de energía. En el cambio de fase una frontera no estacionaria separa las dos fases, siendo su posición desconocida y por lo tanto parte de la solución del problema. Desde el punto de vista físico es el conocido Problema de Stefan planteado en el siglo diecinueve. (Alexiades y col., 1993). Existen numerosos trabajos sobre el tema, la referencia Fukusako S. and Yamada M., 1993 es una excelente revisión sobre solidificación del agua.

El conocimiento y descripción de los fenómenos de transferencia de calor en el cambio de fase de líquido-sólido que ocurren en los evaporadores de fábricas de hielo, es de vital importancia para un aumento en la producción. En el transcurso de un asesoramiento para elevar la producción de una fábrica de hielo en cubitos ubicada en la ciudad de Maracay (Venezuela), se presentó la necesidad de un modelo teórico que cuantificara aproximadamente la generación de hielo en los intercambiadores de la mencionada fábrica. O desde otro punto de vista, una simulación que sirviera para la toma de decisiones prácticas que condujesen a un aumento sustancial en la producción. El evaporador de la mencionada fábrica es de coraza del tipo inundado, con un solo paso de refrigerante debido a la presencia de deflectores internos.

En este trabajo se presenta un sencillo modelo matemático del proceso de formación de hielo dentro de un tubo con flujo de agua interno sumergido en un medio refrigerante, considerando la transferencia de calor en la dirección radial, simulando de manera aproximada lo que sucede dentro de los tubos del evaporador. Aunque ciertamente, en la práctica, este proceso de solidificación del agua es complejo debido a la variación de las propiedades termofísicas y la aparición de diversos mecanismos de transporte, los resultados obtenidos sugieren e indican recomendaciones para mejorar la producción de hielo, tales como disminuir la temperatura del agua de entrada, mejorar las condiciones del refrigerante y lograr las condiciones para mantener el flujo de agua en condición laminar..

1 Nomenclatura

- ϵ *Espesor del hielo [m].*
- h_{fs} *Calor latente de solidificación [kJ/kg].*

h_A *Coficiente de transferencia de calor por convección del agua [$Wm^{-2}K^{-1}$].*

h_R *Coficiente de transferencia de calor por convección del refrigerante [$Wm^{-2}K^{-1}$].*

λ_H *Conductividad térmica del hielo [$Wm^{-1}K^{-1}$].*

λ_t *Conductividad térmica del tubo [$Wm^{-1}K^{-1}$].*

λ_{ai} *Conductividad térmica del aislante [$Wm^{-1}K^{-1}$].*

L *Longitud del tubo [m].*

r_e *Radio externo del tubo [m].*

r_i *Radio interno del tubo [m].*

r_H *Radio de la capa de hielo [m].*

T_A *Temperatura del agua [K].*

T_H *Temperatura de la interfase agua-hielo [K].*

T_R *Temperatura del refrigerante [K].*

T_{OA} *Temperatura del aire exterior [K].*

ρ_H *Densidad del hielo [kg/m^3].*

\dot{Q}_{HR} *Calor transferido por unidad de longitud del tubo [W/m].*

$\bar{\epsilon}$ *Espesor adimensional.*

\bar{t} *Tiempo adimensional.*

2 Modelo matemático unidimensional

Cuando el congelamiento ocurre, en la interfase hielo-agua la temperatura iguala la temperatura de congelamiento. Este comportamiento refleja el hecho que por el congelamiento del agua el calor se transfiere del agua más caliente a través de la capa de hielo, hacia el líquido refrigerante. Esto es un proceso transitorio en el cual el flujo de calor y la temperatura varía con el tiempo. Al inicio, la única resistencia térmica es la debida a la transferencia del fluido refrigerante y a la conducción en la superficie de los tubos del evaporador. El calor es rápidamente transferido del agua al refrigerante y el agua se congela. En la medida que se forma la capa de hielo la resistencia total aumenta y la velocidad de la transferencia de calor disminuye y la tasa de crecimiento de la capa de hielo se hace más lenta.

El evaporador de una fábrica de hielo consiste en un ci-

lindro metálico aislado conteniendo una cierta cantidad de tubos verticales metálicos por los cuales circula agua, la interacción con refrigerante en estado líquido que inunda el cilindro hace que se forme el hielo en el interior de los tubos. Con el objeto de simular aproximadamente la formación del hielo en este tipo de evaporador, plantearemos un modelo que consiste en un tubo metálico con paredes de pequeño espesor, por el cual fluye agua, contenido dentro de otro cilindro de dimensiones muchos mayores inundado con refrigerante a baja temperatura. La temperatura del refrigerante se considerará constante, pruebas experimentales, aislamiento y cantidad de refrigerante, lo avalan.

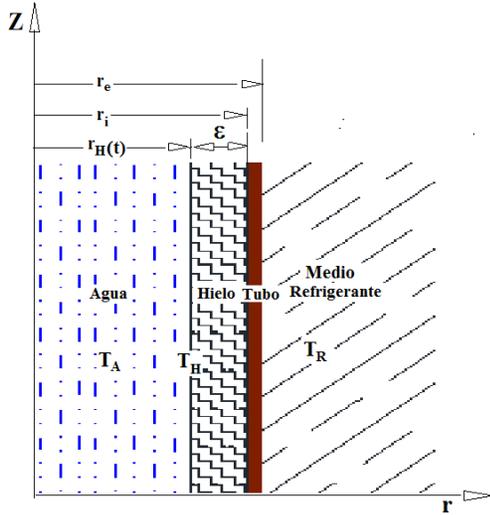


Fig. 1. Modelo que relaciona las variables

El aislante utilizado en este tipo de evaporador polistireno expandido, con una conductividad térmica de 0.023 W/m°K, el radio de la coraza del evaporador es de 0.65 m, estos valores producen una alta resistencia térmica, por lo tanto despreciando la interacción con el aire exterior, en cualquier posición axial la cantidad de calor transferida por unidad de longitud del tubo (\dot{Q}_{HR}) se puede expresar como (Incropera y col., 1999):

$$\dot{Q}_{HR} = \frac{T_H - T_R}{R_{RT}} \quad (1)$$

Donde,

T_H , es la temperatura de la interfase agua-hielo [K].

T_R , es la temperatura del refrigerante [K].

R_{RT} , es la resistencia por unidad de longitud térmica total [m K/W], que se puede expresar como:

$$R_{RT} = R_R + R_T + \frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_H}\right)}{2\pi\lambda_H} \quad (2)$$

Con

$$R_R = \frac{1}{2\pi r_e h_R} \quad (3)$$

$$R_T = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi\lambda_t} \quad (4)$$

Donde,

$$r_H = r_i - \epsilon \quad (5)$$

h_R , coeficiente de transferencia de calor por convección del refrigerante [Wm⁻²K⁻¹].

λ_H , conductividad térmica del hielo [Wm⁻¹K⁻¹].

λ_t , conductividad térmica del tubo [Wm⁻¹K⁻¹].

r_e , radio externo del tubo [m].

r_i , radio interno del tubo [m].

ϵ , es el espesor del hielo [m].

Utilizando la ec. (5), la resistencia térmica total R_{RT} se puede escribir como:

$$R_{RT} = R_T + R_R - \frac{\ln(1 - \bar{\epsilon})}{2\pi\lambda_H} \quad (6)$$

Donde se ha definido el espesor adimensional como:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon}{r_i} \quad (7)$$

De esta manera la resistencia total queda con una parte que solo depende de las propiedades externas y geometría del problema y una parte que depende del radio del hielo

La expresión (6) muestra el esperado resultado del aumento de la resistencia térmica R_{RT} , con el aumento en el espesor del hielo, ya que el último término se hace positivo y crece.

Al igual que la transferencia de calor desde la superficie del agua-hielo al refrigerante, el agua también transfiere calor a la superficie de contacto agua-hielo. Esta ganancia de calor por unidad de longitud (\dot{Q}_{AH}) se puede escribir como:

$$\dot{Q}_{AH} = \frac{T_A - T_H}{R_C} \quad (8)$$

con

$$R_C = \frac{1}{2\pi r_H h_A} \quad (9)$$

Donde

T_A , es la temperatura del agua[K].

R_C , es la resistencia térmica por unidad de longitud entre el agua y la interfase agua-hielo [$m K/W$].

h_A , es el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua [$Wm^{-2}K^{-1}$].

Como la diferencia de temperatura entre el medio refrigerante y la superficie del hielo es muy pequeña, el almacenamiento de calor sensible del hielo se puede despreciar comparándolo con el calor latente de congelación. Por lo tanto se puede considerar que la diferencia entre \dot{Q}_{HR} y \dot{Q}_{AH} es usada para la producción de hielo.

Es decir

$$(\dot{Q}_{HR} - \dot{Q}_{AH}) dt = 2\pi\rho_H h_{fs} r dr \quad (10)$$

Donde,

ρ_H , es la densidad del hielo [kg/m^3].

h_{fs} , es el calor latente de solidificación [kJ/kg].

Introduciendo las expresiones para R_C y R_{RT} se obtiene

$$dt \left[\frac{T_H - T_R}{R_T + R_R - \frac{\ln(1-\bar{\epsilon})}{2\pi\lambda_H}} - \frac{T_A - T_H}{\frac{1}{2\pi r_H h_A}} \right] = 2\pi\rho_H h_{fs} r_H dr_H \quad (11)$$

Definiendo,

$$\bar{t} = \frac{t(T_H - T_R)}{2\pi\rho_H h_{fs} r_i^2 R_T} \quad (12)$$

$$\theta = \frac{T_A - T_H}{T_H - T_R} \quad (13)$$

$$A = \frac{1}{2\pi\lambda_H R_T} \quad (14)$$

$$C = 2\pi r_i h_A R_T \quad (15)$$

Se obtiene la ecuación diferencial adimensional

$$d\bar{t} = \frac{-(1-\bar{\epsilon}) \left(1 + \frac{R_R}{R_T} - A \ln(1-\bar{\epsilon}) \right) d\bar{\epsilon}}{1 - C\theta(1-\bar{\epsilon}) \left(1 + \frac{R_R}{R_T} - A \ln(1-\bar{\epsilon}) \right)} \quad (16)$$

Que se debe integrar con las condiciones iniciales:

$$\bar{t} = 0, \bar{\epsilon} = 0$$

Que corresponde a que en el instante inicial el espesor del hielo es cero.

Es posible integrar analíticamente la ecuación (16) cuando la temperatura del agua es muy cercana a la temperatura de la interfase, y suponiendo un coeficiente de transferencia convectivo constante, resultando

$$\bar{t} = \frac{(1-\bar{\epsilon})^2}{2} (\bar{A} - A \ln(1-\bar{\epsilon})) - \frac{1}{2} \bar{A} \quad (17)$$

Donde

$$\bar{A} = 1 + \frac{R_R}{R_T} + A/2 \quad (18)$$

Esta solución servirá como comparación para las soluciones numéricas y como se mencionó anteriormente corresponde a la situación ideal de generación de hielo.

3 Resultados y Discusión

Las ecuaciones obtenidas dependen, entre otros factores, del coeficiente de transferencia de calor entre el refrigerante y la superficie exterior del tubo donde se forma el hielo h_R y del coeficiente de transferencia de calor entre el agua que fluye dentro del tubo y la superficie del hielo en formación.

Cuando se trata de la estimación de coeficientes de transferencia de calor, hay que considerar que los cálculos no son una ciencia exacta, El valor de estos coeficientes dependen de la configuración física así como de muchas propiedades del fluido que está involucrado.

Para el caso de la transferencia de calor entre el refrigerante y la superficie de los tubos que ocurre en el evaporador inundado referido, el proceso por el cual el refrigerante cambia de líquido a vapor es una combinación de ebullición y evaporación.

Realmente, debido a la gran complicación, no existe un método general que correlacione el coeficiente de transferencia de esta situación. La controversia en la predominancia de los fenómenos convectivos y de ebullición nucleada continúa, y los métodos propuestos hasta ahora no son capaces de predecir la tendencia de los datos experimentales en algunos casos. Esos fenómenos y sus correlaciones en si son un amplio campo de investigación que se evidencia por la gran cantidad de trabajos que existen al respecto. (Incropera y col., 1999, Saiz y col., 2009, Colliery col., 1994, Kandlikar 1990, Murata y col., 1993, Shin y col.,1996) .

La forma general de las correlaciones para el coeficiente de transferencia por ebullición se puede escribir como:

$$h = C_1 \cdot q^m \quad (19)$$

Donde q es el flujo de calor y C₁ depende de la presión reducida y peso molecular del líquido y la rugosidad promedio de la superficie sólida.

En este trabajo, con el objeto de hacer comparaciones, se utilizará la correlación de (Saiz y col., 2009) que han sido probadas recientemente con refrigerantes.

Esta se puede escribir como

$$h_s = 100 \cdot Pr^{0.45} \cdot (-\ln(Pr))^{-0.8} \cdot M^{-0.5} \cdot Rp^{0.2} \cdot q^{(0.9-0.3Pr^{0.2})}$$

Donde Pr es la presión reducida, M el peso molecular, Rp la rugosidad promedio y q el flujo de calor.

En cualquier caso el coeficiente de transferencia convectivo es una función del flujo, es decir

$$h = h(q) \quad (20)$$

Como la resistencia térmica del refrigerante por unidad de longitud, en este caso es función del flujo por unidad de longitud. La ecuación (1) junto la ecuación (6) permite escribir la ecuación implícita siguiente

$$\dot{Q}_{HR} = \frac{T_H - T_R}{R_T + R_R \left(\frac{\dot{Q}_{HR}}{2\pi r_e} \right) - \frac{\ln(1-\bar{\epsilon})}{2\pi\lambda_H}} \quad (21)$$

Con

$$R_R \left(\frac{\dot{Q}_{HR}}{2\pi r_e} \right) = \frac{1}{2\pi r_e h_R \left(\frac{\dot{Q}_{HR}}{2\pi r_e} \right)} \quad (22)$$

La ecuación (21) se puede resolver numéricamente para obtener N valores de \dot{Q}_{HR} para N valores del espesor $\bar{\epsilon}$. Mediante una interpolación polinómica es posible obtener el coeficiente convectivo del refrigerante como una función del espesor $\bar{\epsilon}$ para la correlación referida. Al sustituirla en la ecuación (16) se logra plantear la solución numérica que permite la obtención del espesor adimensional del hielo $\bar{\epsilon}$ en función del tiempo.

Por otro lado se debe esperar una particular dependencia de las soluciones a la ecuación (16) con el coeficiente de transferencia de calor entre el agua que fluye dentro del tubo y la superficie del hielo en formación, la razón es que el flujo de calor hacia el hielo actúa en contra de la formación del mismo.

Para el coeficiente de transferencia del agua se probará con el número de Nusselt para condiciones laminares completamente desarrolladas, con una temperatura superficial constante. (Incropera y col., 1999).

$$\bar{N}_{UD} = 3.66 \quad (23)$$

Y la clásica correlación Dittus- Boelter para flujo turbulento dentro de tuberías.

$$\bar{N}_{UD} = 0.0265 R_{eD}^{0.8} P_r^{0.3} \quad (24)$$

Con el objeto de comparar las soluciones a la ecuación ec. (23), se utilizarán datos físicos de un evaporador de la fábrica de hielo, $r_e = 0.01905$ m, $r_i = 0.017$ m, L= 3 m $T_R = 264.5$ °K, $\lambda_t = 14.02$ [Wm⁻¹K⁻¹] (acero AISI 304).

Las condiciones del refrigerante R-22 necesarias son, presión crítica P_{crit} = 49.9 bar, temperatura de 265 °K (-8.15°C), presión del refrigerante P_{R22} = 3.721 bar.

Por la tanto para la presión reducida, se obtiene

$$P_R = \frac{P_{R22}}{P_{crit}} = 0.07457$$

La rugosidad estándar Rp de la tubería comercial es de 0,6 μm, el peso molecular M del R-22, es 86.47

En todos los casos la integración de las ecuaciones se hará hasta un espesor adimensional ($\bar{\epsilon}$) de 0.7, que corresponde al espesor ideal del hielo ($\epsilon = 12$ mm)

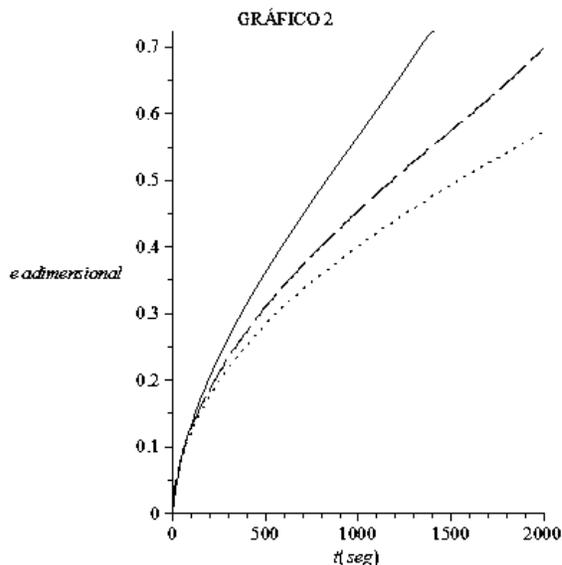


Fig. 2 Espesor adimensional del hielo en función del tiempo para tres temperaturas de agua
 ----- Temperatura del agua = 0°C
 - - - - - Temperatura del agua = 10°C
 Temperatura del agua = 15°C

La figura 2 muestra la variación del espesor con el tiempo para distintas temperaturas de entrada del agua y una única temperatura del refrigerante ($T_R = 265 \text{ }^\circ\text{K}$). La línea sólida corresponde a una temperatura del agua de 0°C , la línea segmentada a una temperatura de 10°C y la punteada a 15°C .

Se observa el resultado esperado, al disminuir la temperatura del agua de entrada, disminuye el tiempo necesario para la obtención de determinado espesor. Para un espesor ideal ($\epsilon = 12\text{mm}, \bar{\epsilon} = 0.7$), el tiempo para la temperatura del agua mayor ($T_A = 15^\circ\text{C}$) es de 38 minutos, mientras que para la temperatura de $T_A = 10^\circ\text{C}$ es de 33 minutos. En el caso ideal ($T_A = 0^\circ\text{C}$) el tiempo es del orden de 20 minutos.

Es interesante obtener soluciones para los casos en los cuales el agua circule en régimen laminar y en régimen turbulento, ec. (23) y (24)

La figura 3 muestra las soluciones correspondientes a una temperatura del agua de 10°C y los coeficientes de transferencias derivados de las relaciones ecuaciones (36) y (37).

La línea sólida corresponde la condición laminar del agua (ec. 23), la línea segmentada a la turbulenta (ec.24). Se observa, para el régimen turbulento, una disminución de la tasa de crecimiento del hielo, inclusive cerca del espesor igual a 0.45 se hace prácticamente cero. Cuando alcanza el espesor ideal en el régimen laminar, en el turbulento es casi un 50% menor.

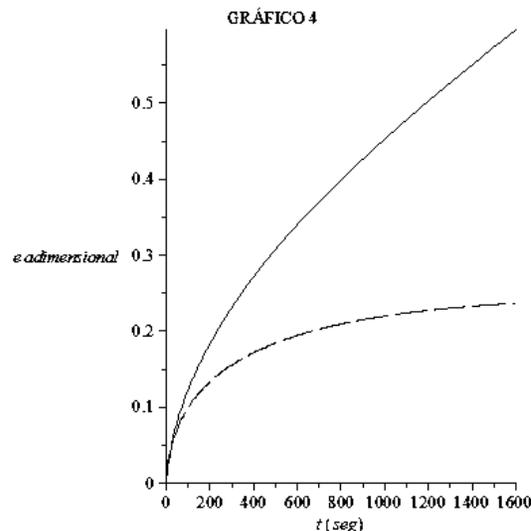


Fig. 3 Espesor adimensional del hielo en función del tiempo para dos correlaciones
 Régimen laminar
 - - - - - Régimen turbulento

4 Conclusiones

A pesar de la sencillez del modelo matemático, se ha podido simular la generación de hielo en un evaporador inundado, obteniéndose los resultados observados en un fabricante de hielo comercial. Tal como se mencionó en la sección en la cual se hace el planteamiento del problema, el objetivo del sistema de generación de hielo de la fábrica es el de obtener el espesor de hielo ideal, en tiempos cercanos a los 25 minutos. Los resultados de esta simulación, a pesar de la sencillez, producen tiempos de ese orden para una temperatura del agua cercana a 0°C .

Las correcciones sobre las condiciones iniciales del agua sugeridas por los resultados obtenidos, conllevan a un aumento sustancial en la producción de hielo. Este resultado refuerza la recomendación practicada en campo, de mejorar una recirculación del agua que no se convertía en hielo pero disminuía su temperatura. En la fábrica mencionada, se presentaba una considerable pérdida de esta agua fría, que hacía necesaria una reposición con agua externa a temperatura ambiente.

Otra recomendación, tal como disminuir al máximo la temperatura del refrigerante, se encuentra apoyada por los resultados mostrados. Y por supuesto la recomendación de evitar la turbulencia del agua que fluye en los tubos del evaporador queda sustentada por los resultados mostrados en la figura 7.

Es importante acotar que un evaporador típico para la fabricación de hielo puede contener del orden de 125 tubos, que en conjunción a la disminución en los tiempos de generación, conducen a un valioso aumento de producción. Lo relevante de los resultados obtenidos sugiere profundizar

el modelo matemático, para lograr ese objetivo actualmente se está utilizando métodos de dinámica de fluidos computacional para generar simulaciones dependientes del tiempo, con simetría axial en dos dimensiones. Los resultados se mostrarán en una comunicación futura.

Referencias

- Alexiades V, Solomon AD, 1993, Mathematical modeling of melting and freezing processes. Hemisphere Publishing Corporation. USA
- Collier JG, Thome JR, 1994, Convective Boiling and Condensation. Third edition Clarendon Press Oxford 1994
- Cooper MG, 1984, Heat flow rates in saturated nucleate pool boiling. A wide-ranging examination using reduced properties. Advances in Heat Transfer, Vol. 16, pp. 157-239.
- Hu Henry, Argyropoulos A, 1996, Mathematical modelling of solidification and melting: a review. Modelling Simul. Mater Sci. Eng (4) 371-396
- Fukusako S, Yamada M, 1993, Recent Advances in Research on Water-Freezing and Ice-Melting Problems. Experimental Thermal and Fluid Science 1993; (6) 90-105
- Incropera FP, De Witt DP, 1999, Fundamentos de Transferencia de Calor. Cuarta edición. Pearson Prentice Hall. México.
- Kandlikar SG, 1990, A General Correlation for Saturated Two-Phase Flow Boiling Heat Transfer inside Horizontal and Vertical Tubes, Trans. ASME J Heat Transfer, (112) 219-228.
- Murata K, Hashizume 1993, Forced Convective Boiling of Nonazeotropic Refrigerant Mixtures inside Tubes, Trans. ASME J Heat Transfer (115) 680-688.
- SaizJabardo JM, Ribatski G, Stelute E, 2009, Roughness and surface material effects on nucleate boiling heat transfer from cylindrical surfaces to refrigerants R-134a and R-123, Experimental Thermal and Fluid Science (33) 579-590
- Shin JY, Kim MS, Ro ST, 1996, Correlation of Evaporative Heat Transfer Coefficients for Refrigerant Mixtures, International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Purdue University.

Jinete, María Elena: Ingeniero Mecánico, Profesora de La Cátedra Refrigeración y Aire Acondicionado, Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela.

Ávila, Manuel: MSc en Ingeniería Mecánica, Profesor de La Cátedra de Instalaciones Térmicas, Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela. Correo electrónico: ammanuel@ula.ve

Diseño de un agente inteligente para emular un entrenador de gimnasio

Altamiranda, Junior^{12*}; Aguilar, Jose²³; Jaimes, Julio²; Cuevas, Roger²; Villegas, Yosephaider²

¹Departamento de Computación, Escuela de Sistemas, Facultad de Ingeniería

²CEMISID, Facultad de Ingeniería

Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

³Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

*altamira@ula.ve

Resumen

El deporte entendido como actividad motriz, representa un fundamento y una condición importante, no sólo para el desarrollo físico, sino también para el desarrollo intelectual y socio afectivo. No debemos analizarlo únicamente desde el punto de vista biológico, sino que debemos asumir la repercusión que el mismo posee sobre todas las dimensiones del ser humano. Por otro lado, desde hace algunos años se ha venido generalizando en el mundo el afán por estar y verse bien, enfatizado en la imagen corporal que el sujeto y los otros perciben de él. Normalmente, las personas buscan solucionarlo con la asistencia a los Centros de Actividad Física. El asesoramiento y asistencia se encuentra enfocado a optimizar los recursos personales del deportista, y a contribuir en el progreso de la calidad del manejo táctico y de rendimiento al momento de implementar las rutinas. Por otro lado, la Inteligencia Artificial comprende el estudio y desarrollo de programas para imitar el comportamiento humano mediante máquinas o computadoras, con funciones para aprender, reconocer, pensar y adaptarse de acuerdo con la experiencia. El presente trabajo es un acercamiento para integrar la inteligencia artificial al bienestar y el confort de las personas dentro de un entorno inteligente utilizando un agente inteligente. En ese sentido, se propone un agente inteligente que emule un entrenador de gimnasio. El diseño del Agente Inteligente es estructurado en 5 etapas, tal que le permitan ser autónomo e interactuar con el ambiente. En particular, el agente debe generar rutinas óptimas para los usuarios, las cuales les servirán a ellos para que obtengan un máximo rendimiento al momento de realizar sus ejercicios.

ISBN: 978-980-11-1858-9



9 789801 118589

1 Introducción

El entrenamiento deportivo es un proceso donde es necesario la planificación y la dedicación para el entrenador, además, de mucha disciplina para el deportista.

Las personas que realizan ejercicios en los gimnasios desiertan con regularidad, debido a que las acciones desarrolladas en los centros de actividad física se alejan del ideal de entrenamiento, y de las condiciones físicas y de salud que desean los usuarios.

El asesoramiento y asistencia se encuentra enfocado a optimizar los recursos personales del deportista, contribuyendo en el progreso y rendimiento al momento de implementar las rutinas de los ejercicios.

La Inteligencia Artificial comprende el estudio y desarrollo de programas para imitar el comportamiento humano mediante máquinas o computadoras, con funciones para aprender, reconocer, pensar y adaptarse de acuerdo con la experiencia (Aguilar y col., 2013; Altamiranda y col., 2015).

Por medio de la Inteligencia Artificial, se ha desarrollado agentes inteligentes que pueden imitar la capacidad mental de un ser humano, relacionando reglas almacenadas en una base de conocimiento y la experiencia, para luego plantear soluciones a un problema, que son mejores y que se alcanza más rápidamente.

El análisis del entrenamiento que tendrá la capacidad de definir el agente propuesto, será totalmente personalizado, ya que manejará los parámetros físicos de cada usuario. Gracias a estas características, el agente inteligente abarcará una amplia gama de preferencias de rutinas de ejercicios, desde entrenamientos específicos y especializados de un atleta de alto rendimiento, hasta sesiones enfocadas al mantenimiento de un estilo de vida sano.

Existen algunos trabajos en esta área. En (Ruttkay col., 2008) se desarrolló un agente inteligente virtual (IVA) capaz de actuar de manera similar a un entrenador real, para ejercicios físicos que debe realizar un usuario. Proporcionando la información necesaria a éste, estructura los ejercicios asegurándose que sean acordes a la actividad física requerida, y también para motivar al individuo. El trabajo que se presenta aquí difiere de este, porque primero se hace una evaluación de las condiciones físicas del individuo, para después diseñar una rutina de ejercicios que van a ser realizados por medio de un conjunto de máquinas, en el caso anterior son ejercicios físicos. En (Henriet2016) se propone un sistema educativo utilizando inteligencia artificial para proponer variadas lecciones a los entrenadores. El proceso de adaptación, proporciona un conjunto ordenado de ejercicios que siguen los objetivos y sub-objetivos elegidos por los entrenadores. Este proceso se ha enriquecido mediante la inclusión de la noción de la distancia entre los ejercicios, ordenandos jerárquicamente. Así, los usuarios son guiados hacia sus objetivos a través de un hilo conductor. Al igual que el trabajo anterior, los ejercicios que se proponen son

físicos, y no para ser ejecutados en las máquinas instaladas en un gimnasio.

En este trabajo, el agente fue desarrollado para que tenga varias habilidades (búsqueda, conocimiento, planificación, incertidumbre, aprendizaje), para lograr la autonomía y que pueda interactuar con el usuario.

2 Marco Teórico

2.1 Agentes Inteligentes

En la literatura, existen diversas definiciones del término agente, desde distintos puntos de vista, por lo cual, aún no existe una definición universalmente aceptada. Entre estas definiciones podemos resaltar:

- Según (Shoham Y., y col., 2009) “Usualmente, cuando la gente usa el término agente se refiere a una entidad que funciona continua y autónomamente, en un entorno en el cual otros procesos ocurren y existen otros agentes”.
- Según (Russell S., y col., 2004) “Un agente es una entidad que percibe su entorno y actúa bajo estas percepciones”.
- Según (Franklin S., y col., 1996) “Un agente autónomo es un sistema situado en, y como parte de, un entorno, que detecta dicho entorno y actúa en él, en búsqueda de sus propios objetivos”.
- Según (Wooldridge M., y col., 1995) “Es un sistema de hardware o, principalmente, software, que es autónomo, reactivo y social”.
- Según (Ferber J., 1999) “Es un hardware o software que puede actuar sobre sí mismo o sobre su ambiente y puede comunicarse con otros agentes. Por otro lado, tiene objetivos individuales y su comportamiento es el resultado de las observaciones, conocimientos, habilidades e interrelaciones que él puede tener con otros agentes o con su ambiente”.
- Según (Weiss G.,1999) “Un agente es un sistema computacional que está situado en un ambiente, y que es capaz de tomar acciones autónomas en ese ambiente con el fin de cumplir sus objetivos de diseño”.

Usando una combinación de estas definiciones, podemos decir que un agente es (Aguilar y col., 2013):

“Un sistema informático situado en un entorno (ambiente), capaz de realizar acciones autónomas dentro de ese entorno para alcanzar sus objetivos”. La figura 1 ilustra la noción más simple de un agente.

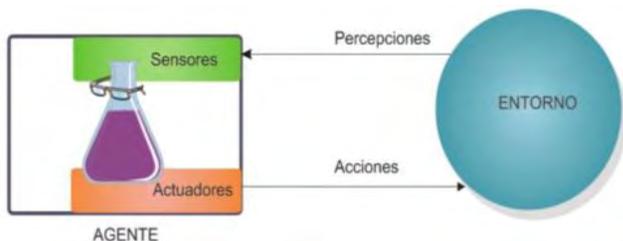


Fig. 1. Esquema de interacción básica de un agente (Aguilar et al, 2013).

En este caso, el agente inteligente es un software que, basándose en su propio conocimiento, realiza un conjunto de operaciones destinadas a satisfacer las necesidades de un usuario que se encuentra en un gimnasio, que dispone de un conjunto de rutinas y ejercicios para diferentes músculos. Éstos deben ser configurados por el agente por iniciativa propia, o porque se requiere según las preferencias del usuario. De esta manera, el agente inteligente propuesto tiene las siguientes características: proactivo, reactivo, flexible, autónomo, flexible, adaptativo, y racional para poder interactuar con el entorno.

3 Problema

Diseñar un agente inteligente con la capacidad de razonar y aprender, que pueda interactuar, para así generar rutinas de ejercicios óptimas, las cuales le servirán al usuario para obtener un máximo rendimiento al momento de realizar el entrenamiento en un gimnasio.

4 Diseño del Agente Inteligente

El diseño del agente está formado por cinco etapas, las cuales le permiten tener una estructura eficiente para ser autónomo, las cuales son:

- Búsqueda
- Conocimiento
- Incertidumbre
- Planificación
- Aprendizaje

La estructura del agente se muestra en la figura 2.

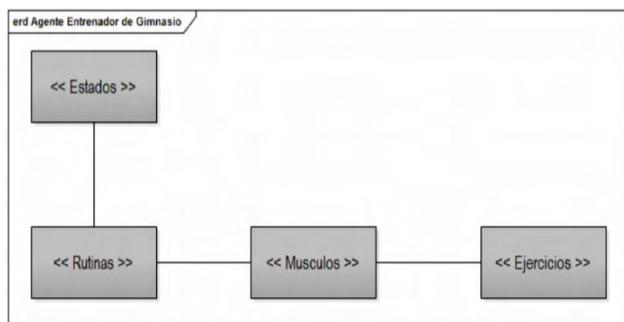


Fig. 2. Estructura del Agente Entrenador de Gimnasio.

4.1 Búsqueda

Está basado en encontrar el estado en que la persona se encuentre inicialmente (condición física). Esto se realiza a partir de los datos del usuario suministrados al sistema por medio de una encuesta. Luego, automáticamente se genera el estado en el que se encuentra, y sugiere las rutinas para cada ejercicio durante su semana de entrenamiento. La estructura de la encuesta se muestra en la Tabla 1

Tabla 1. Estructura de la Encuesta

Elementos de la Encuesta	
	Nombre
	Cédula
	Edad
	Sexo
	Meses a Entrenar
	Peso
	Estatura

La búsqueda se realizará tomando en cuenta los parámetros (peso, estatura, edad), el agente será el encargado de establecer el entrenamiento adecuado, por medio de la condición física en que se encuentra la persona.

Al momento de asignar el entrenamiento el agente tomara en cuenta:

- Índice de Masa Corporal
- Preferencia

De esta manera, cada estado del usuario va a tomar los siguientes valores tabulados en la tabla 2.

Tabla 2. Estructura de cada Estado del Usuario

Elemento	Valor
Índice de Masa Corporal (IMC) ¹	1. $IMC \leq 20$ (Bajo Peso) 2. $21 \leq IMC \leq 25$ Normal 3. $IMC \geq 26$ Obesidad
Preferencia	1. Definir Masa Muscular 2. Aumentar Masa Muscular

A partir de los elementos que se encuentran en la Tabla 2 se construye un árbol de búsqueda. Cada nodo va a estar a representar un estado (ver figura 3) y va a estar formado por: IM (índice de masa), Pref. (Preferencia) y Entrenamiento que contiene una lista con las posibles rutinas y ejercicios a realizar en cada sesión.



Fig. 3. Estructura del Nodo para el árbol de búsqueda.

¹ $IMC = \text{Peso} / \text{Estatura}$

El estado inicial del árbol es: (IM = 0, Pref = 0) que constituye la raíz del árbol (ver Figura 4). Cada nodo tendrá un entrenamiento específico asociado (en la figura 4. esta representado por la x) a la combinación del estado actual.

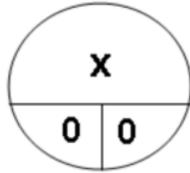


Fig. 4. Raíz del árbol de búsqueda.

El primer nodo posible es: (IM = 3, Pref = 1), siendo el entrenamiento más básico (ver figura 5). Representa un usuario con obesidad y que desea definir la masa muscular.

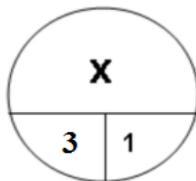


Fig. 5. Primer Nodo posible del árbol.

Descendiendo en el árbol de búsqueda se decrementa en uno el valor dado para IM para cada hijo y con los nodos adyacentes se incrementa en uno la preferencia, de esta manera se construye el árbol de búsqueda (ver figura 7).

Los nodos con combinaciones de IM y Pref no posibles, tendrán solo asociado el entrenamiento adecuado, por ejemplo, para el caso del nodo (IM =3, Pref = 2), que representa un usuario con obesidad no puede optar por un conjunto de rutinas para aumentar la masa muscular, el agente inteligente le recomendará hacer un entrenamiento para definir la masa muscular inicialmente. Igual se presenta en el caso del nodo (IM = 1, Pref = 1).

Dado que el agente contará con un conjunto de datos dados por el usuario, se implementó la búsqueda utilizando el algoritmo de primero el mejor, para su operación se necesita la lista de nodos y una función de evaluación, (ver figura 6).

Esto permite realizar una exploración heurística de la condición física y el tipo de entrenamiento que el usuario puede realizar. Luego se selecciona e conjunto de ejercicios óptimos que debe realizar, éstos se encuentran almacenados en una lista. El algoritmo para realizar la selección funciona de la siguiente manera:

1. Se asigna memoria a una variable de tipo estado
2. Se busca las rutinas que se pueden realizar según el peso del usuario
3. Se regresan el conjunto de rutinas seleccionadas

Lista Búsqueda Rutinas (real: IMC) {

```

tipo_estado auxiliar = asignar_Memoria (ti-
po_estado())
Iterator <tipoEstado>Iterador = lista.iterador()
Lógico_bandera = falso

Mientras (iterador.hasNext() y bandera ≠ cierto){
    auxiliar = iterador.siguiete()
    Si (auxiliar.buscarperso(IMC)){
        auxiliar.rutinas.inicio()
        bandera = cierto
    }
}
Retornar auxiliar
}
    
```

Fig. 6. Algoritmo de Búsqueda

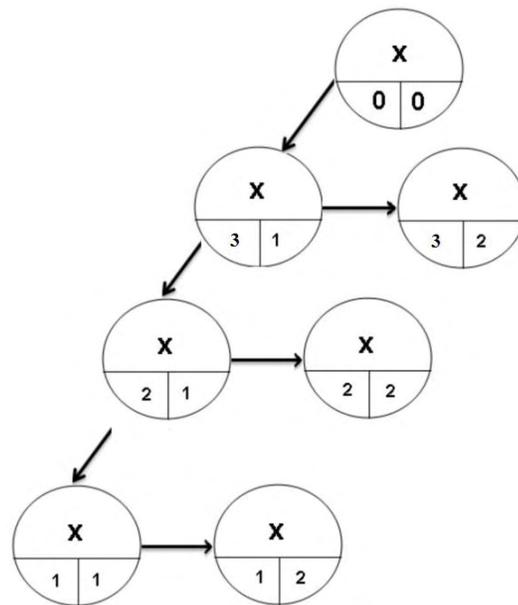


Fig. 7. Árbol de búsqueda para el agente inteligente

El algoritmo que utiliza la función de evaluación se muestra en la figura 8.

```

Si (NodoActual.IM = IMdeseado)
    NodoActual = NodoHermano
Sino
    NodoActual = NodoHijo
Fin Si
    
```

Fig. 8. Función de Evaluación

El algoritmo utilizado en la búsqueda del nodo en el grafo es el mostrado en la figura 9.

```

1. Repita mientras (Nodo ≠ Vacio)
2. Nodo = NodoActual
3. Si (NodoActual.IM = IMdeseado y
    NodoActual.Pref = Prefdeseada)
    Retornar Entrenamiento
    Fin
    Sino
    Evaluar los Nodos Sucesores con la Función
    de Evaluación
    Expandir nodo no expandido más deseable

Fin Repita
    
```

Fig. 9. Algoritmo utilizado en la búsqueda del nodo en el grafo.

4.2 Conocimiento

El agente entrenador de gimnasio se enfrenta a situaciones diferentes según el usuario y la información que éste proporciona al sistema; el agente debe tomar decisiones a partir del reconocimiento de patrones según la condición física del individuo. La base de conocimiento va a permitir orientar a la persona a elegir un conjunto de rutinas de entrenamiento para diferentes situaciones.

La base de conocimiento se implementó usando sentencias en lógica de predicados de primer orden, las cuales se describen a continuación.

Representación del sexo del usuario

$$\forall X \text{ Persona}(X) \Rightarrow \text{Hombre}(X) \vee \text{Mujer}(X)$$

Representación del rango de edad en que se encuentra

$$\forall X \text{ Persona}(X) \Rightarrow \exists y \exists w \text{ Rango}(y, w) \\ \rightarrow (n \vee a \vee d) \wedge \neg(n \wedge a \wedge d) \wedge \neg(n \wedge a) \wedge \neg(n \wedge d) \\ \wedge \neg(a \wedge d)$$

Dónde: y valor numérico
w valor numérico
n = niño
a = adolescente
d = adulto

Representación del tipo de edad del usuario

$$\forall X \text{ Persona}(X) \wedge \exists e \text{ Edad}(e) \\ \Rightarrow \text{Mayor_que}(e, 10) \wedge \text{Menor_que}(e, 12) \Rightarrow \text{niño}(X)$$

Dónde: e es un valor numérico

$$\forall X \text{ Persona}(X) \wedge \exists e \text{ Edad}(e) \\ \Rightarrow \text{Mayor_que}(e, 12) \wedge \text{Menor_que}(e, 18) \\ \Rightarrow \text{adolescente}(X)$$

$$\forall X \text{ Persona}(X) \wedge \exists e \text{ Edad}(e) \\ \Rightarrow \text{Mayor_que}(e, 18) \wedge \text{Menor_que}(e, 100) \\ \Rightarrow \text{adulto}(X)$$

Representación de la Condición Física del Usuario

$$\forall x \text{ Persona}(X) \wedge \exists e \text{ Edad}(e) \wedge \exists z \text{ Estatura}(z) \\ \wedge \exists p \text{ Peso}(p) \Rightarrow \text{CondicionF}(X, e, z, p) \\ \rightarrow (m \vee b \vee c) \wedge \neg(m \wedge b \wedge c) \wedge \neg(m \wedge b) \wedge \neg(m \wedge c) \\ \wedge \neg(b \wedge c)$$

Dónde: m = mala
b = buena
c = excelente

Representación de las rutinas

$$\forall X \text{ Persona}(X) \wedge \exists e \exists z \exists p \text{ CondicionF}(X, e, z, p) \\ \Rightarrow \exists r \text{ GenerarR}(r)$$

Dónde:

$$\exists r \text{ Rutina}(r) \Rightarrow \exists e \exists z \exists p \text{ CondicionF}(X, e, z, p) \\ \Rightarrow \exists p \text{ AsignarP}(p) \wedge \exists rp \text{ AsignarRep}(rp) \\ \wedge \exists sr \text{ AsignarSeries}(sr)$$

Donde:

rp = repeticiones para cada ejercicio
sr = series de cada ejercicio

4.2.1 Ontología

Una ontología es un sistema de conceptos (o un vocabulario) usado como elemento básico (primitivo) para la construcción de la base de conocimiento del agente entrenador de gimnasio. En nuestro caso, es una representación, de un conjunto de conceptos en el dominio del agente entrenador de gimnasio, y de las relaciones entre ellos. El conocimiento se representa dentro de una ontología a través de:

- Conceptos
- Relaciones
- Funciones
- Instancias

Conceptos: Son las ideas básicas que se quieren formalizar para definir el agente entrenador de gimnasio. Estos son:

- Encuesta
- Estado
- Rutinas
- Músculos
- Ejercicios

Relaciones: Representan las interacciones entre los conceptos del agente entrenador de gimnasio (ver figura10)

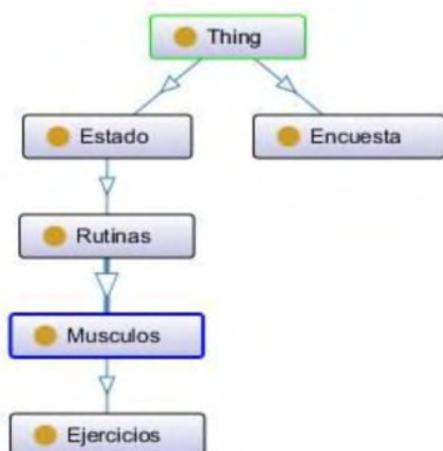


Fig. 10. Relaciones entre los conceptos del agente entrenador de gimnasio

La relación Estado – Encuesta tiene una propiedad simétrica (ver figura. 11). Ya que a partir de la encuesta puedo llegar al estado físico del usuario, o el caso contrario, a partir del estado físico podría saber los valores que el usuario ingreso a la encuesta. Así se puede hacer con cada uno de los conceptos que están relacionados.

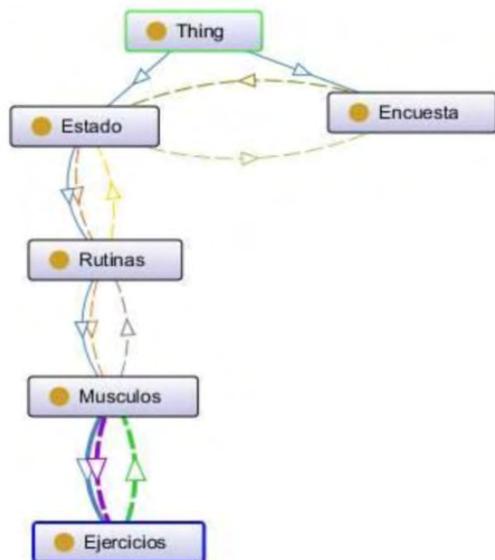


Fig. 11. Función simétrica Estado – Encuesta – Rutinas – Músculos – Ejercicios

Funciones: Describe a un individuo, pudiendo enlazarlo con otro.

Instancias: representan elementos o individuos en la ontología => hechos. Para cada una de las definiciones/conceptos definidos antes, se muestra un ejemplo de instancia (ver figura 12, 13, 14)

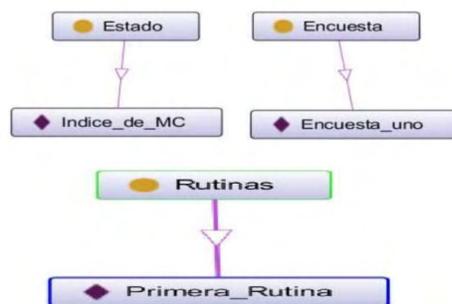


Fig. 12. Instancia Estado – Encuesta – Rutinas

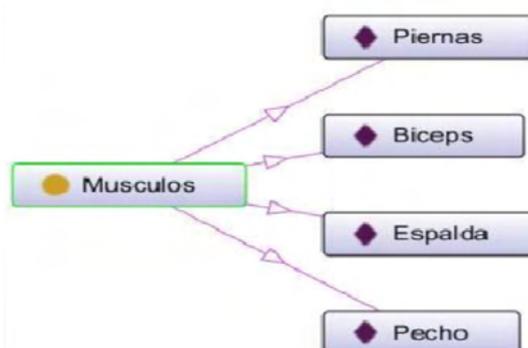


Fig. 13. Instancia Músculos

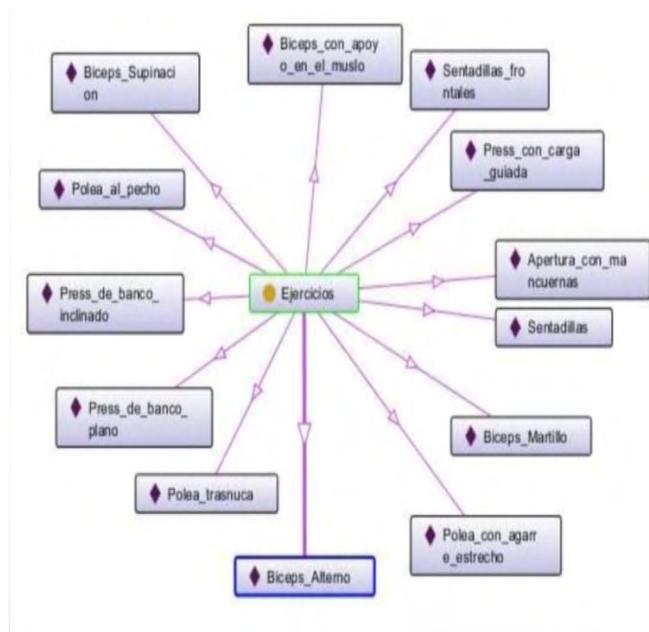


Fig. 14. Instancia Ejercicios

4.3 Incertidumbre

La incertidumbre que debe manejar el agente inteligente, proviene de los datos suministrados por el usuario al inicio de la sesión de entrenamiento. Para la gestión de la incertidumbre se usa un sistema difuso. Los atributos selec-

cionados son:

- El peso
- La edad
- La estatura
- Condición física del usuario

La regla de base del sistema difuso es:

Si el peso, la edad y la estatura, entonces la condición física

Los conjuntos difusos de las variables de entrada están definidos de la siguiente manera:

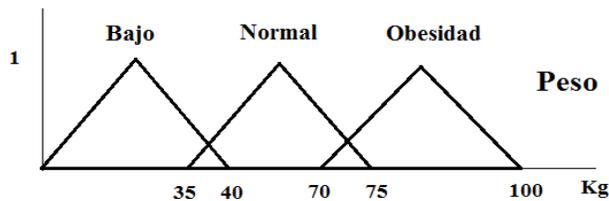


Fig. 15. Conjunto Difuso para el peso de un usuario

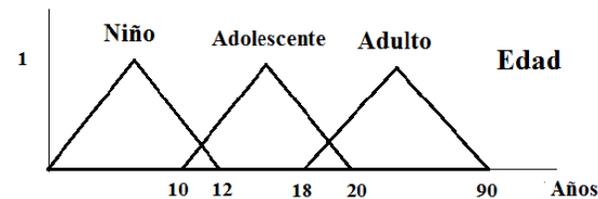


Fig. 16. Conjunto Difuso para la edad de un usuario

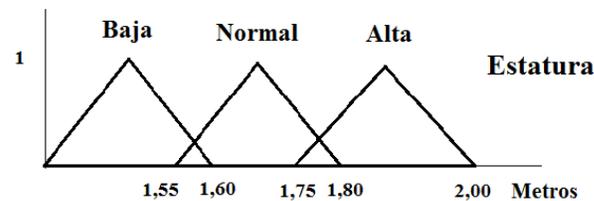


Fig. 17. Conjunto Difuso para la estatura de un usuario

El conjunto difuso que define la salida se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Conjunto de Valores para la Salida

Condición	Tipo
Mala	0
Buena	1
Excelente	2

Los ejercicios y rutinas que propone el agente inteligente dependen de los factores anteriores. Para definir el tipo de condición se tomó en cuenta lo expresado anteriormente, y se construyeron un conjunto de reglas difusas, algunas de ellas son:

- Si el peso es bajo, la edad es niño y la estatura es baja, entonces la condición es mala
- Si el peso es obeso, edad vejez, estatura baja, entonces condición física mala
- Si peso normal, edad adulto, estatura media entonces condición física es buena
- Si peso normal, edad adolescente, estatura alta, entonces condición física es excelente.

4.4 Planificación

Para realizar la planificación de las rutinas de ejercicios, el agente utiliza los datos suministrados por el usuario en la encuesta. Él debe decidir el tipo de entrenamiento que desea realizar (por ejemplo, definir o aumentar la masa muscular), y a partir de allí, el agente realizará el plan para llevar a cabo dicho objetivo. El agente propuesto tiene la capacidad de:

- Realizar un conjunto de acciones para que el usuario logre un determinado objetivo en el entrenamiento.
- Razonar sobre las posibles acciones a realizar para llevar a cabo un plan específico.
- Buscar un plan para lograr cierto objetivo.

A continuación, se describe parcialmente el plan utilizado por el agente (ver en figura 18 el plan completo). Cada una de las operaciones del plan (nodos del grafo de la Fig. 18) son descritas de la siguiente manera:

- Nombre: Encuesta
- Edo. Inicial: Preparar Encuesta
- Objetivo: Solicitar datos del usuario
- Operadores:
 - Acción: Introduzca Datos
 - Pre-Cond: Iniciar Sistema
 - Efecto: Guardar los Datos

El resto de operaciones se describe de la misma manera. Por otro lado, cada vez que una operación es invocada, ocurre lo siguiente:

- Iniciar Sistema: Ejecutar(s)
 - Acción: Encuesta(p), IntroducirDatos(s,p)
 - Efecto: GuardarDatos(s,p)
- Donde:
- s: Sistema
 - p: Persona o Usuario

Finalmente, de manera general, cada operación es descrita, según la notación Strips, como:

Op(
 A: Encuesta(p),
 IntroducirDatos(s, p)
 Pre-Cond: Ejecutar(s)
 Objetivo: GuardarDatos(s,p)), en BaseDatos(Datos(p))

En general, la representación del plan en notación

Strips es:

- Nombre: Condición Física
 - Edo. Inicial: Solicitud de ayuda
 - Objetivo: Mejorar Condición Física
 - Operadores:
 - Acción:
 - Encuesta(p),
 - Generar Objetivos(Sn)
 - GenerarRutinas(R)
 - RealizarRutinas(s,p)
 - Pre-Cond: SistemaEnEjecución(s)
 - Efecto: CondiciónObjetivo (p)
- Op(Encuesta(p),
- Generar Objetivos(Sn)
 - GenerarRutinas(R)
 - RealizarRutinas(s,p)
 - TestObjetivos:CondiciónObjetivo(p,Sn)
 - Pre-Cond: SistemaenEjecución(s)
- Plan: [MejorarCondiciónFísica(s,p,Sn)]
- Donde:
- Sn: Condición Física Deseada

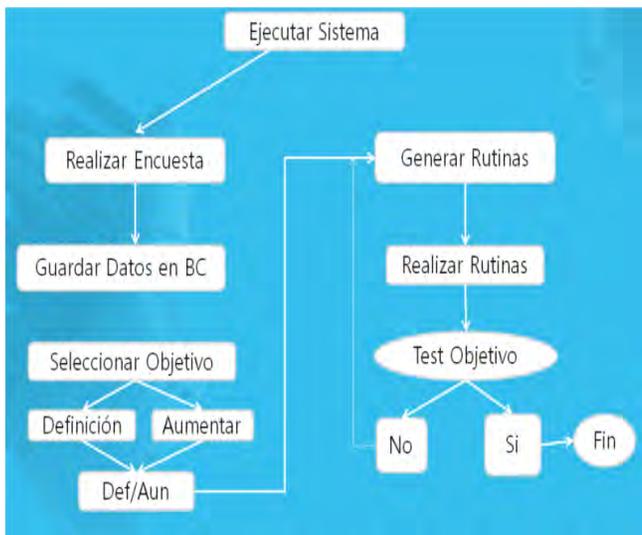


Fig. 18. Plan de Orden Parcial para el Agente propuesto.

4.5 Aprendizaje

El aprendizaje permite incrementar el conocimiento adquirido, para así realizar la asignación de rutinas y ejercicios con mayor eficiencia. En el agente propuesto se utiliza el aprendizaje por refuerzo para priorizar los ejercicios, que le permite a él alcanzar una meta. Esto se logra haciendo que el agente interactúe con el ambiente muchas veces, reuniendo información acerca de las recompensas obtenidas, después de realizar diferentes ejercicios en diferentes

estados físicos. Luego se utiliza la ecuación (1) para determinar la recompensa r que tendrá cada ejercicio, que depende del estado S y del estado s' :

$$V_c(S, t + 1) \leftarrow V_{c,t}(S, t) + \alpha[r + \gamma V_c(s', t - 1) - V_c(S, t - 1)] \quad (1)$$

Donde:

$V_{c+1}(s)$ = Valor del ejercicio c en un estado S , en el momento $t+1$

$V_c(s)$ = Valor del ejercicio c en un estado S , en el momento $t+1$

α = tasa de aprendizaje

γ = tasa de descuento, que pondera las recompensas pasadas respecto de las actuales (toma valores entre 0 y 1), en diferentes estados.

El agente inteligente propuesto realiza el aprendizaje según las siguientes condiciones:

- Si el usuario al momento de realizar el conjunto de rutinas y ejercicios dado por el agente inteligente, se lesiona o no le gusta el/los ejercicio(s) propuestos, para el siguiente entrenamiento tiene la opción de decirle al agente cual(es) ejercicio(s) no quiere hacer en la rutina.
- Si el usuario quiere realizar nuevamente el ejercicio, tiene la posibilidad de decirle al agente, y a partir de ese momento, el agente le permita volver a ser seleccionado en su siguiente rutina.

Así, en general el agente asigna una penalización a los ejercicios que al usuario no le gusto (valor de r negativo), y da una recompensa si éste desea repetir un ejercicio (valor de r positivo).

4.6 Integración de todas las habilidades

En esta sección describimos como se integran las habilidades anteriores, en el agente inteligente. Al iniciar el agente se ingresan los datos del usuario, luego automáticamente el sistema evalúa a éste para determinar en qué condición física se encuentra, y asignarle un estado. Una vez obtenido el estado, el agente inteligente se encarga de seleccionar las rutinas al usuario para su respectivo entrenamiento, tomando en cuenta los músculos y ejercicios a trabajar. En la figura 19 se muestra una representación completa del agente entrenador de gimnasio usando diagramas de clases.

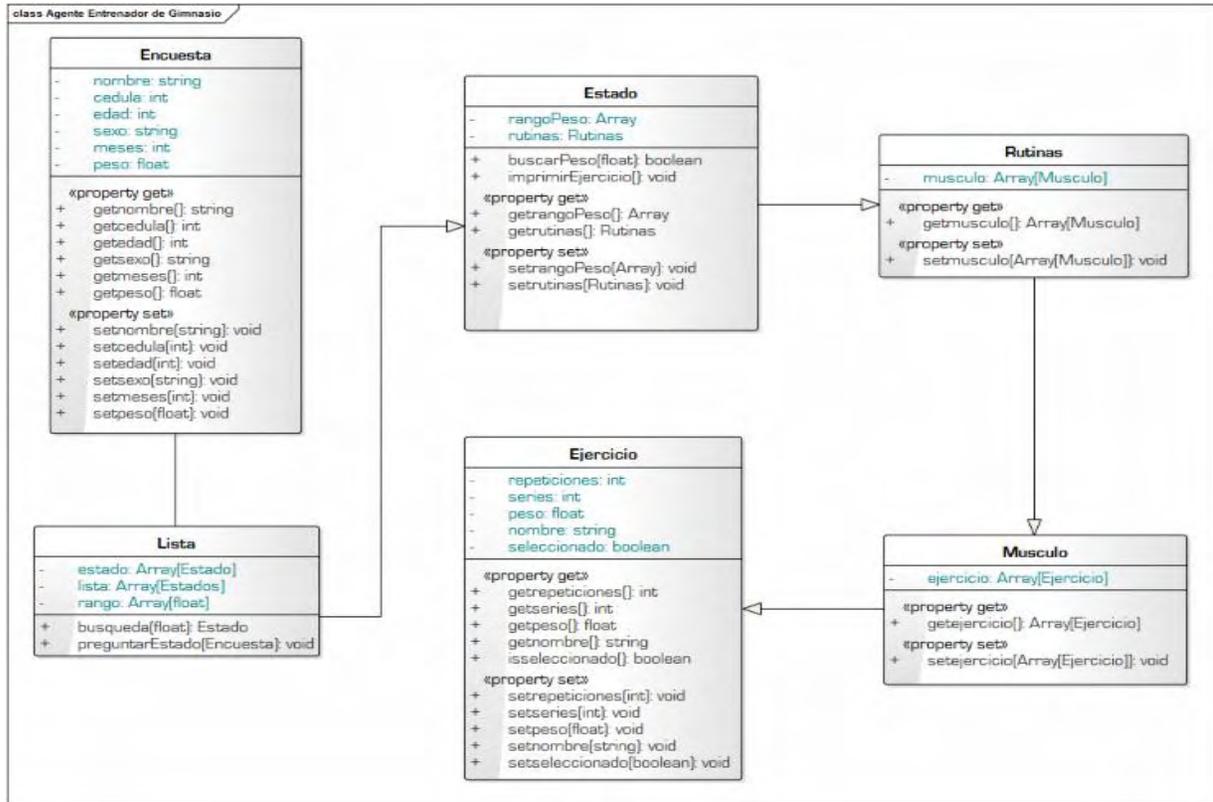


Fig. 19. Diagrama de Clases del Agente propuesto

5 Caso de Estudio

Se simuló el agente inteligente para ser utilizado por un usuario que realiza actividades en un gimnasio, para evaluar el funcionamiento del agente entrenador de gimnasio. Al iniciar el agente inteligente (ver figura 20), realiza una encuesta que le permite determinar el estado físico del usuario.

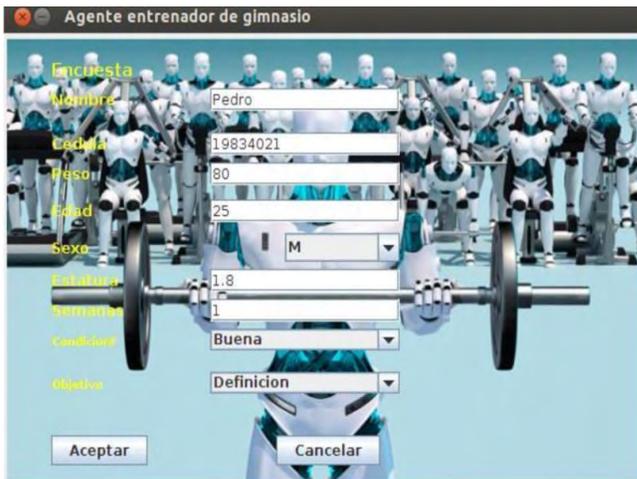


Fig. 20. Encuesta del Agente Inteligente.

En la figura 20 se observan los datos introducidos por el usuario, y el objetivo que éste desea alcanzar con sus entrenamientos. A partir de esta información, el agente realizará un plan de entrenamiento (ver figura 21).

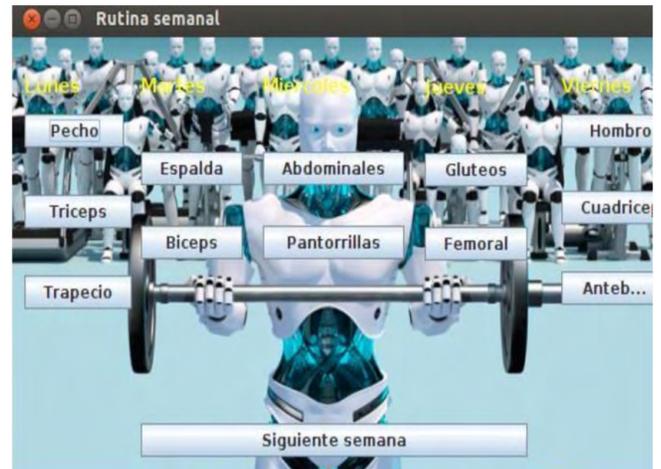


Fig. 21. Plan de Entrenamiento propuesto por el Agente.

En esta etapa (ver figura 21), el agente ya generó las rutinas de ejercicios para cada musculo, para una semana de entrenamiento del usuario, junto con sus respectivos días.

Para ver en detalle cada uno de los ejercicios, se debe presionar el botón para cada musculo (ver figura 22).



Fig. 22. Lista de Ejercicios para pecho.

En la figura 22, se puede observar los ejercicios seleccionados por el agente para pecho, los cuales son cuatro. Luego, el usuario presiona cada uno de los ejercicios para desplegar como se deben ejecutar (ver figura 23, 24).



Fig. 23. Ejercicio Pectoral Constructor



Fig. 24. Ejercicio Press en Banca Inclínada

En la figura 23 y figura 24 se observa el peso que debe levantar, el número de repeticiones para cada ejercicio, la manera correcta de ejecutarlo, y un video de demostración de cómo se debe realizar. Cada uno de los pasos anteriores se realiza para los ejercicios planteados en cada rutina para cada musculo a ejercitar.

Si el usuario no le gusta un ejercicio propuesto, se puede seleccionar la opción bloquear. Al final de cada rutina se despliega una ventana, que muestra los ejercicios bloqueados (ver Fig. 25).



Fig. 25. Ejercicios Bloqueados.

Por otro lado, al finalizar la semana de entrenamiento el agente pide actualizar el peso del usuario (ver figura 26), para ver si el entrenamiento ha sido exitoso o no.

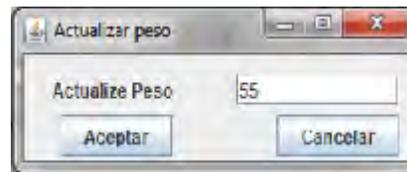


Fig. 26. Actualizar peso del usuario.

Luego, dependiendo del resultado, el agente inteligente le propone nuevas rutinas si el resultado no es exitoso, o repite nuevamente los ejercicios ya planteados si es exitoso.

Al finalizar el entrenamiento, el agente pregunta si el usuario llevo al resultado que esperaba (ver figura 27), es en este momento que se realiza el aprendizaje reforzado.

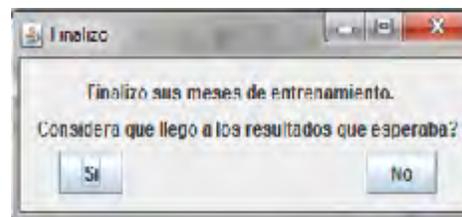


Fig. 27. Fin del entrenamiento.

6 Conclusiones

El presente trabajo muestra cómo integrar la inteligencia artificial al bienestar y confort de las personas que realizan actividades en un gimnasio. Permite darle al usuario de

un gimnasio la posibilidad de entrenar de manera independiente; es decir, sin la necesidad de un entrenador personal, ya que el agente lo sustituye para realizar sus rutinas de entrenamientos.

El diseño del agente está basado en cinco habilidades, cada una utiliza algoritmos distintos que se integran para darle una funcionalidad eficiente al momento de interactuar con un usuario.

El usuario puede modificar los ejercicios a medida que realiza las rutinas, las cuales el agente tomará en cuenta para próximos entrenamientos (aprende).

Por otro lado, el cliente puede decidir entre rutinas para aumentar de peso o definir los músculos y el agente le asigna la rutina que le permitirá llevar a cabo sus objetivos.

Este trabajo tiene que ser tomado como punto de partida en este campo, y no como un resultado final. Como trabajo futuro, proponemos diseñar funciones que permita ser multiusuario, es decir, maneje varios usuarios al mismo tiempo. Por último, es fundamental realizar la migración a plataformas móviles, para que sea más práctico para el usuario.

Agradecimientos

Al Proyecto CDCHTA I-1407-14-02-B de la Universidad de Los Andes por su apoyo financiero.

Referencias

Aguilar J, Rios A, Hidrobo F, Cerrada M, 2013, Sistemas Multiagentes y sus aplicaciones en Automatización Industrial, Universidad de Los Andes, Segunda Edición.

Altamiranda J, Cadavid D, Santiago L, Mazzei J, Sosa J, 2015, Diseño de un Agente Inteligente para Modelar un Entorno Inteligente, Proceedings Conferencia Nacional de Computación, Informática y Sistemas (CoNCISa 2015), pp. 232 - 241.

Ferber J, 1999, Multi-agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence, Addison-Wesley Professional.

Franklin S, Graesser A, 1996, Is it an agent, or just a program? A taxonomy for autonomous agent, In third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, Springer-Verlag. pp. 21-35.

Henriet J, 2016, Artificial Intelligence-Virtual Trainer: An educative system based on artificial intelligence and designed to produce varied and consistent training lesson, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology.

Rusell S, Norvig P, 2004, Inteligencia Artificial: Un Enfoque Moderno, Prentice Hall. Madrid

Ruttkay Z., Van Welbergen H, 2008, Elbows higher! performing, observing and correcting exercises by a virtual trainer, In International Workshop on Intelligent Virtual Agents pp. 409-416. Springer Berlin Heidelberg.

Shoham Y, Leyton-Brown, 2009, Multiagent system: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations, Cambridge University Press.

Wooldridge M, Jennings N, 1995, Intelligent agent: Theory and practice, The Knowledge Engineer Systeming Review, Vol 10. N° 2. pp. 115-152.

Weiss G, 1999, Multi-agent System: a modern approach to distributed artificial intelligence, MIT Press, New York.

Altamiranda, Junior: PhD en Ciencias Aplicadas, Profesor Asistente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes.

Aguilar, José: PhD en Computación, Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes. Correo electrónico: aguilar@ula.ve

Jaimés, Juli: Ingeniero de Sistemas, Escuela de Sistemas. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes. Correo electrónico: altamira@ula.ve

Cuevas, Roger: Ingeniero de Sistemas. Escuela de Sistemas. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes. Correo electrónico: altamira@ula.ve

Villegas, Yosephaider: Ingeniero de Sistemas. Escuela de Sistemas. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes. Correo electrónico: altamira@ula.ve