

- **Experiencia colombiana hacia un estándar técnico para gestión de integridad en líneas de transporte de hidrocarburos**
- **Mejoramiento de la productividad en la industria manufacturera mediante la aplicación de recubrimientos duros**
- **Modelo de evaluación de curvas de niveles de un embalse**
- **Tecnología de estabilización/solidificación (E/S) para el manejo de residuos sólidos peligrosos utilizando cemento pórtland**
- **Dirigibles Autónomos no Tripulados (AUV)**

04
Octubre - Diciembre de 2009

ISSN 0121-5132

P.V.P. Colombia \$12.000,00



Publicación admitida por Colciencias en el Índice Nacional de Publicaciones Seriadas, Científicas y Tecnológicas colombianas - Publindex - Clasificación tipo C
Publicación incluida en Ulrichsweb.com™
Tarifa postal reducida No. 2008-107
Vence 31 de diciembre de 2009

ESCUELA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

Editorial

RICARDO SALAZAR FERRO

Decano de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

ricardo.salazar@escuelaing.edu.co

A pesar del discreto crecimiento económico con el que culmina el 2009 (0,4%), el año nos deja con un buen sabor en la boca. La economía colombiana se presentó como una de las más fuertes y mejor equipadas para amortiguar el impacto de la crisis económica mundial que sacudió los mercados desde finales de 2008. Su comportamiento para 2009 sólo lo superaron Perú (0,9%) y Argentina (0,9%), en América Latina. Es más, el último trimestre de este año muestra un incremento notablemente superior (2,5%) en los indicadores económicos frente a la contracción que tuvo lugar en los tres trimestres anteriores.

En particular, el sector de la construcción, según estimaciones de Fedesarrollo, cierra el año con un crecimiento del 3,8%, elevado en comparación con otros sectores de la economía. Este crecimiento se vio impulsado por la ejecución de importantes obras civiles relacionadas con proyectos de minería y transporte de hidrocarburos, así como también las medidas que el gobierno nacional tomó para fomentar el acceso a la vivienda de los sectores sociales menos favorecidos.

El año 2010, sin embargo, plantea grandes retos a la industria nacional. Uno de los factores que contribuyeron de manera considerable a sortear las dificultades derivadas de la crisis económica mundial a lo largo del 2009 fue el incremento de la demanda pública en un 10,2%, que permitió contrarrestar la contracción de la demanda privada. El año próximo, sin embargo, vendrá acompañado de un conjunto de restricciones que permiten suponer que el nivel de gasto público se reducirá. Confiando en la sensatez de las autoridades económicas, es previsible que entren en vigencia políticas tendientes a moderar el gasto público para buscar un equilibrio en la balanza fiscal.

A esto se suma la caída de los ingresos fiscales que se deriva de la contracción de la demanda por parte de los países desarrollados y las restricciones comerciales que han impuesto los países vecinos. Ante la disminución de los niveles de producción y exportación es predecible un deterioro de los recaudos tributarios y, con esto, una reducción de los recursos dirigidos a la financiación de las obras públicas.

Por lo demás, 2010 será un año electoral. Esto agrega restricciones para la concesión de obras y la asignación de gastos por parte del Estado, derivadas de la ley de garantías electorales; por tanto, es poco plausible que la demanda pública asuma en el próximo año el papel protagonista que desempeñó en el pasado como motor de la estabilización de la economía.

De todo esto se deriva la importancia de la iniciativa privada para sortear las dificultades que el 2010 parece traer. Uno de los factores que deben abordarse en forma inmediata es la apertura de horizontes a nuevos mercados que liberen las exportaciones de la inestabilidad resultante de la dependencia tan fuerte generada hacia mercados restringidos.

Otro motivo de preocupación es la reducción del consumo de los hogares, vinculado estrechamente al aumento del nivel de desocupación y la caída de los niveles de confianza de los consumidores. Aquí se presenta un nuevo reto para los empresarios, que deben tomar más en serio las potencialidades de la demanda interna de sus productos en una economía que, en lo que se refiere a la población activa, es considerable.

Apostar por el mercado interno implica enfrentar, entonces, el problema del desempleo. Los índices de desocu-

pación se vienen incrementando de manera gradual y se aproximan lentamente a niveles críticos. El compromiso de los empresarios es fundamental a la hora de idear alternativas que contribuyan a la generación de empleo. El aumento de la población económicamente activa se traduce en un incremento del consumo de los hogares y, con esto, en un aumento de la demanda interna. La generación de empleo redundará en la aparición de nuevos nichos en los cuales se podrán posicionar los productos de la industria nacional, y además contribuirá a la mejora de las condiciones de vida de sectores sociales actualmente marginados.

En 2009, el sector de la construcción contribuyó de modo significativa en este aspecto. A lo largo del año tuvo lugar un aumento notable del número de personas ocupadas en dicho gremio, ejemplo que deben tratar de reproducir otros sectores de la economía.

Otro de los retos que afrontarán las empresas consiste en optimizar sus procesos productivos para incrementar sus niveles de competitividad. En este sentido, consideramos imprescindible fortalecer la alianza entre empresa y universidad, el sector privado y el sector educativo, para que juntos se constituyan en el motor de crecimiento e innovación de la economía nacional.

Experiencia colombiana hacia un estándar técnico para gestión de integridad en líneas de transporte de hidrocarburos

Colombian experience toward a technical standard for integrity management of oil transportation lines

JUAN DAVID BETANCUR Y EDWIN MAURICIO ACOSTA

Corporación para la Investigación de la Corrosión. Km 2 vía El Refugio, sede UIS, Guatiguará, Piedecuesta (Santander)

jbetancur@corrosion.uis.edu.co / macosta@corrosion.uis.edu.co

Recibido: 10/08/09 Revisado: 30/08/09 Aceptado: 15/09/09

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En este artículo se muestra una experiencia colombiana en el desarrollo de una norma técnica para transporte de gas y de líquidos peligrosos, cuya finalidad es establecer una normatividad ajustada a las condiciones del país, como problemas de orden público y deslizamientos de tierra.

Se hace un seguimiento cronológico y se muestra el estado del arte en normalización en el cual se encuentra Colombia. Se discuten dos aspectos relevantes: el manejo del terrorismo y el vandalismo, y el tema de áreas de alta consecuencia.

Palabras claves: normalización, integridad en ductos.

Abstract

In this paper is showed a Colombian experience about the development of a technical standard related to gas/oil transportation by pipelines to determine the most adequate standard that applies at specific conditions in Colombia, as terrorism and earth movements. Two relevant subjects are discussed in this paper- the terrorism-vandalism management and the high consequence areas.

Keywords: standardization, pipeline integrity.

INTRODUCCIÓN

Se puede considerar que el establecimiento inicial de un estándar técnico (normatividad), y la incipiente regulación en el transporte de hidrocarburos en Colombia, comienza con la expedición del Decreto 1056 del 20 de abril de 1953, mediante el cual se generó el Código de Petróleos Colombiano. El 14 de diciembre de 1995, por medio del Decreto 2190, se ordenó la elaboración del Plan Nacional de Contingencia contra Derrame de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas en Aguas Marinas, Fluviales y Lacustres (PNC), que se adoptó finalmente mediante el Decreto 321 del 17 de febrero de 1999. En ese mismo año se expidió el Decreto 2053 del 15 de octubre de 1999, el cual promulga “el convenio 174 sobre la prevención de accidentes industriales mayores”, adoptado en la 80ª reunión de la Conferencia General de la Organización Internacional del Trabajo (Ginebra, 22 de junio de 1993) [1-3].

En el caso de transporte de gas, en 1991 se aprobó el Plan para la Masificación del Consumo de Gas, mediante el cual se trazó una política macroeconómica y energética integral, y se establecieron facilidades para la construcción de gasoductos, con el esquema de concesión. En 1992, la Comisión Nacional de Energía aprobó el sistema de transporte de gas, separándolo en troncal, subsistemas y distribución [1-3].

Posteriormente, con la Ley de Servicios Públicos de 1992 se creó la Comisión de Regulación de Energía y Gas (Creg), para regular el suministro de gas en sus actividades de transporte y distribución. Mediante esta ley se separan las funciones del Estado de la siguiente manera: política le corresponde al Ministerio de Minas y Energía; regulación, a la Creg; planeación e información, a la Unidad de Planeación Minero Energética, y control, a la Superintendencia de Servicios Públicos. Así mismo, se estableció un sistema de transporte de gas independiente de los productores, comercializadores y distribuidores, que garantizará el acceso en igualdad de condiciones a todos los usuarios [1-3].

Mediante la Resolución 071 de 1999 se creó el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural por Redes (RUT), el cual compendia la regulación tarifaria y el cumplimiento de estándares y normas técnicas y de seguridad que se deberán aplicar para el diseño, construcción, operación, mantenimiento y puesta en marcha del Sistema Nacional de Transporte de Gas Natural, tomando en consideración la compilación del Código

de Normas Técnicas y de Seguridad efectuada por el Ministerio de Minas y Energía [1-3]. Sin embargo, en cuanto al cumplimiento de estándares y normas técnicas en el aspecto de integridad en tuberías de transporte de hidrocarburos, el RUT remite al cumplimiento de normas emitidas en otros países, como el DOT 49CFR de Estados Unidos [4], u otras normatividades que no pueden aplicarse directamente en Colombia debido a las diferencias estructurales de organización de nuestros sistemas de transporte de gas natural frente a los que se tienen en otros países.

El concepto de integridad en el transporte de hidrocarburos se ha integrado a los esquemas regulatorios y de normas técnicas internacionales desde el año 1996, debido a que los incidentes en tuberías pueden causar pérdida de vidas humanas y daños a la propiedad y al medio ambiente. En Estados Unidos, mediante el acta de 2002 de la Pipeline Safety Improvement [5], se obliga a que los operadores de líneas de transporte tengan un Programa para la Administración de la Integridad de sus tuberías (IMP, *Integrity Management Program*), que incluye la línea base y la revaloración periódica de secciones de la tubería que pasan por zonas calificadas de alta consecuencia. En el Reino Unido, la regulación en seguridad de tuberías, aprobada en 1996, requiere que cada operador tenga un documento de prevención de accidentes en el que todos los riesgos a la línea de transporte estén identificados [6].

Por otra parte, en 2004 Asme generó el suplemento a la norma B31.8 [7], que indica una manera de gestionar un programa de integridad para líneas que transportan gas. Algo similar realizó API mediante la norma API Standard 1160, en cuanto al transporte de líquidos peligrosos [8]. Actualmente, Colombia no cuenta con una norma técnica específica en la que se aplique el concepto de integridad en el transporte de hidrocarburos, expedida por el Icontec u otra entidad del Estado.

Con esta motivación, en 2006, contando con la participación de varias empresas del sector de hidrocarburos y del gobierno nacional, por intermedio de Colciencias y el Ministerio de Minas y Energía, la Corporación para la Investigación de la Corrosión promovió la organización de varias mesas de trabajo para constituir la Red Nacional de Integridad de Líneas (Rednil). Como resultado de ello, se conformaron dos comités técnicos del Icontec, en los cuales participan empresas del sector transporte

de hidrocarburos (Petrobrás, Ecopetrol, Promigás, Ocesa, Hocol, Tecnicontrol, EPM, Tubos del Caribe, Tubocaribe, Surtigás, Petrocolombia, Sika, ISA, Ismocol, Oxy, BP, Mansarovar), universidades (UIS, UPTC, Uninorte), centros de desarrollo tecnológico (CIF, ICP), y el Ministerio de Minas y Energía, entre otros.

En este artículo se describen los resultados obtenidos del trabajo de los comités, el cual consistió principalmente en elaborar normas técnicas colombianas para el transporte de hidrocarburos, que se adecuarán a las condiciones del país, dado que la normatividad internacional está diseñada para países con características geográficas y sociales diferentes de las colombianas. Se describen los puntos más importantes que se han discutido en el seno de ambos comités, y se hace una reflexión al respecto de cada uno de ellos.

PUNTO DE ARRANQUE

La primera reunión de trabajo se celebró en la ciudad de Bucaramanga, entre el 2 y 3 de marzo de 2006. De las conclusiones emanadas del debate [9], se destacan las siguientes:

- El tema de gestión y aseguramiento de la integridad es bastante amplio y presenta un nivel de complejidad tal que es muy difícil de abordar en su extensión total, por lo cual se requiere que este proceso se realice de manera paulatina.
- Es necesario generar una línea base que permita tener un nivel mínimo de conocimiento sobre las regulaciones y normatividades existentes en el ámbito internacional, y que estén relacionadas con el tema de gestión y aseguramiento de la integridad.
- El tema de integridad en tuberías de transporte de hidrocarburos tiene un componente social que no se puede desconocer, lo cual hace indispensable la existencia de una regulación para transporte de hidrocarburos, enfocada en las condiciones específicas del país. La implementación de los sistemas de gerenciamiento y aseguramiento de integridad no debe hacerse exclusivamente porque exista una regulación, sino porque ha de responder a la necesidad de realizar un transporte eficiente, confiable y rentable de los hidrocarburos.
- Para llegar a la consolidación de una regulación en el tema de integridad adecuada a las condiciones

de frontera del transporte de hidrocarburos por tubería en el país, se requiere analizar y adaptar la normatividad internacional, enriqueciéndola con las experiencias propias de las empresas del sector.

Como resultado de la primera mesa de trabajo, se identificó la necesidad de avanzar en el tema de la regulación en Colombia sobre el sistema de gestión y administración de la integridad requerido por un operador de una línea de producción o transporte de hidrocarburos, de modo que sirva como marco de referencia para las empresas de este tipo.

Se programó en consecuencia una segunda mesa de trabajo, la cual se realizó en Bogotá el 11 de mayo de 2006, y a la que se invitó a empresas operadoras, el gobierno nacional y los integrantes del sistema Innovación. Se presentaron los sistemas de gestión y administración de integridad de algunas de las empresas operadoras (Eopetrol, Petrobrás, BP, Promigás, Ocesa), con el objetivo de determinar similitudes y diferencias que permitieran trazar una línea base en pro de la regulación, así como estructurar en forma conjunta un plan de acciones para seguir en el marco de Rednil. Entre las conclusiones emanadas del debate de la segunda mesa de trabajo, sobresalen éstas:

- El primer objetivo de Rednil es identificar, generar y validar una normatividad con los requerimientos mínimos que debe tener un programa de administración y gestión de integridad. De este modo, el aspecto de regulación se abordará luego de generar la normatividad.
- El segundo objetivo es compartir experiencias con el ánimo de generar conocimientos en gestión de integridad.
- Se identificó, una vez realizadas las exposiciones de las compañías, que existen elementos comunes en el manejo de los sistemas de gestión de integridad. Se evidenció una tendencia de las empresas a tomar como referencia los elementos presentes en la regulación de Estados Unidos (DOT 49CFR Part 192 y Part 195).
- En la propuesta de regulación se debe distinguir claramente entre una normalización para transporte de gas y otra para transporte de líquidos peligrosos. Además, debe ser factible de aplicar según las condiciones económicas, tarifarias, geográficas y regulatorias del país.

- Se determinó que se debe contar con la participación activa del Ministerio de Minas y Energía, del Icontec y de la Creg.

Efectivamente, para la tercera mesa de trabajo, efectuada en Bogotá el 31 de agosto de 2006, se contó con la participación del Icontec, entidad que presentó el proceso de elaboración de normas técnicas colombianas y definió los conceptos de normalización y norma. Según este instituto, normalización es aquella actividad que establece, en relación con problemas reales o potenciales, soluciones para aplicaciones repetitivas y comunes, con el objeto de lograr un grado óptimo de orden en un contexto dado, y norma, el documento establecido por consenso y aprobado por un organismo reconocido, que establece, para un uso común y repetido, reglas, directrices o características. También participó el Ministerio de Minas y Energía, cuyo representante dio a conocer las directrices para la elaboración de reglamentos técnicos.

Finalmente, se presentó un borrador con los requerimientos mínimos que una regulación colombiana podría contener en cuanto al tema de gestión de integridad de gasoductos y líneas de transporte de hidrocarburos, basándose en las características de la Regulación Federal CFR 49 Part 195 Subpart F, numerales 195.450 y 195.452 (en forma de preguntas) y la Federal CFR 49 Part 192, Subpart O (basada en la norma Asme B31.8, estructurada en forma de preguntas). Se expuso un paralelo entre los elementos que se encuentran contemplados para líneas de transporte de gas y de hidrocarburos líquidos en la legislación estadounidense, el cual se resume a continuación:

- Los hidrocarburos líquidos no incluyen plan de comunicaciones ni plan de control de calidad dentro del tema de integridad.
- Para gas se permiten revaluaciones de frecuencias de inspección como resultado de programas basados en desempeño, pero para hidrocarburos líquidos no.
- Para gas se establecen indicadores de desempeño por reportar, pero para hidrocarburos líquidos no.
- En la generación del plan de línea base se dan tiempos más largos para la implementación en gas que en hidrocarburos líquidos.

Luego de la presentación de estos ítems y del debate realizado, la conclusión principal es que el punto

de partida debe ser la normatividad ya existente en el tema de gestión y aseguramiento de la integridad, así como en cada uno de los subtemas que lo componen. En consecuencia, de la tercera mesa de trabajo se concluyó:

- No continuar con la iniciativa de elaborar un borrador de reglamento técnico; se trabajará inicialmente en la obtención de una norma técnica colombiana, teniendo en cuenta qué exigencias tiene la formulación de un reglamento técnico.
- Se estructurará la norma técnica colombiana para gas a partir del Asme B31.8S
- Se estructurará la norma técnica colombiana para líquidos a partir de Asme B31.4 y API 1160.
- Cabe anotar que el vecino país de Brasil ha adoptado estas dos normas en su esquema de normatividad y regulación para transporte de hidrocarburos.
- En los comités para el avance de la NTC se discutirán los conceptos básicos de integridad y se solicitarán presentaciones a los expertos en los temas que se vayan abordando.

Luego de esto, se definieron dos comités técnicos: uno para construir la norma para transporte de gas (comité 159) y otro para transporte de líquidos peligrosos (206). La metodología se describe a renglón seguido.

METODOLOGÍA Y SELECCIÓN DE TEMAS RELEVANTES DE DISCUSIÓN

La metodología consistió en elaborar un anteproyecto de norma a partir de la traducción y diagramación de los documentos de referencia: el API Estándar 1160 (*Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines*) y el Asme B31.8S - 2004 (*Managing System Integrity of Gas Pipelines*), para transporte de líquidos peligrosos y para transporte de gas natural, en ese orden, en los comités respectivos. Ya existían algunos borradores iniciales de ciertos capítulos, que se pusieron a disposición de los miembros de Rednil y del comité.

La consolidación de comentarios y la coordinación estuvieron a cargo de la secretaría técnica de Icontec, a través del formato establecido para este fin, el cual contiene los campos de entidad, numeral, observación y sustentación técnica.

Se expuso la propuesta de tiempos de revisión de los documentos borradores iniciales (para el año 2006),

los cuales se aprobaron como se muestra en el siguiente cuadro:

Revisión	Comité Gas	Comité Líquidos
Comentarios capítulos 1-2	1-20 de septiembre	18 de septiembre - 18 de octubre
Reunión	28 de septiembre	26 de octubre
Comentarios capítulos 3 - por definir	2-20 de octubre	30 de octubre - 24 de noviembre
Reunión	27 de octubre	30 de noviembre

Después de esta revisión del borrador inicial, se hizo la traducción completa de las normas Asme B31.8S y API 1160, y posteriormente se procedió a realizar un estudio sistemático de cada uno de sus capítulos. Con el propósito de facilitar la revisión de aspectos de fondo durante las reuniones plenarias del comité, se acordó ajustar la traducción de los capítulos en grupos de trabajo. Así, por ejemplo, para el caso del comité 206, a partir del capítulo séptimo, esta tarea se distribuyó entre las empresas que conforman Rednil y los comités de la siguiente manera:

Capítulos 7 y 8:	Ocensa - Promigás
Capítulos 9 y 10:	Ecopetrol - CIC
Capítulos 11, 12, 13 y 14: Anexos A, B, C y D:	Tecnicontrol - Petrobrás - Hocol Tenaris - Corpro Tecna - BP

Los grupos de trabajo se organizaron para estudiar y corregir el contenido técnico de los capítulos asignados, con base en los acuerdos logrados en los comités de gas y líquidos. Para ello se concertó que hubiese reuniones mensuales de cada uno de los comités hasta agotar el estudio, incluida la fase de revisión final de la nueva Norma Técnica Colombiana desarrollada. Ya se terminó el proceso para la futura NTC en transporte de gas, y se espera finalizarlo para el año 2010 en el caso de líquidos.

Durante el ejercicio de estas reuniones mensuales de los comités y de Rednil se detectaron, entre otros, los siguientes puntos de discusión como de alta prioridad:

- Vandalismo - terrorismo (no son claros estos conceptos).
- Áreas de alta consecuencia (AAC) o áreas de accidente mayor (AAM) (el Estado no ha definido cuáles son estas áreas).
- Centro de llamada único para emergencias (no existe).

Las actas (documentos públicos) en las que se resume el resultado de cada una de las reuniones de Rednil y de los comités se encuentran almacenadas en la página web <http://corrosion.uis.edu.co/RNIL>, la cual es fácil de consultar.

A continuación se mostrarán la discusión y la conclusión a la que se llegó en tres temas relevantes, de otros asuntos que se trataron en las reuniones de los comités.

TRATAMIENTO DADO A LOS TEMAS RELEVANTES

Vandalismo - terrorismo

El tema fue de discusión debido a la presencia permanente de situaciones de terrorismo en Colombia, lo cual de entrada constituye una diferencia fundamental respecto al tratamiento que pueden dar otros países en su estándar técnico.

El primer hecho encontrado fue la discusión inicial sobre el significado de los conceptos de terrorismo y vandalismo, desde el punto de vista jurídico, en nuestro país y en el ámbito internacional.

La investigación realizada por CIC y los comités del Icontec al respecto indicó que en Colombia existe doctrina generalizada en el sentido de señalar que el vándalo es aquella persona que a través de sus actos (vandálicos) sólo busca la intención de hacer un daño sobre cosas corporales, sin ninguna clase de motivación. Por el contrario, el terrorismo son actos cometidos por una organización que conllevan un interés político, económico, social, religioso, etc., frente al poder del Estado. Lo que prima en la distinción entre vandálico y terrorista es si el acto se encuentra motivado por alguno de los intereses anteriormente señalados –terrorismo–, o si la intención es sólo causar un daño –vandalismo– lejano a esa connotación.

En el ámbito mundial, la Corte Penal Internacional no tiene cobertura sobre este delito y por tanto carece de una definición universalmente aplicable. La Corte ha señalado que cada país debe caracterizar las acciones o grupos calificados de “terroristas”.

En este aspecto, se discutió si debe hacerse algún tipo de gestión para prevenir el daño al ducto por actos terroristas, y por tanto sí podría considerarse en el análisis de integridad. Pero la naturaleza de los actos de vandalismo frente a los actos terroristas es tan diferente, que en muchos países (entre ellos Estados Unidos) el manejo del terrorismo se hace mediante

análisis de vulnerabilidad, que es diferente de la gestión de integridad.

Por tal motivo, no resulta factible hacer gestión de integridad sobre terrorismo, ya que todos los esfuerzos finalmente pueden ponerse en duda frente a la ocurrencia de los hechos, teniéndose así un elevado grado de incertidumbre y la imposibilidad de ejercer prevención y control. Un ejemplo sobre el tratamiento dado al terrorismo frente al vandalismo es la no cobertura de los seguros por este factor, dada la imposibilidad de verificar una gestión efectiva por parte de las empresas. Es decir, el tratamiento del terrorismo se hace por un análisis de vulnerabilidad y desde el punto de vista práctico se acomete en el ámbito de seguridad física, únicamente.

En Colombia, el delito de terrorismo se encuentra definido de la siguiente manera:

“El que provoque o mantenga en estado de zozobra o terror a la población o a un sector de ella, mediante actos que pongan en peligro la vida, la integridad física o la libertad de las personas o las edificaciones o medios de comunicación, transporte, procesamiento o conducción de fluidos o fuerzas motrices, valiéndose de medios capaces de causar estragos, incurrirá en prisión de diez (10) a quince (15) años y multa de mil (1.000) a diez mil (10.000) salarios mínimos legales mensuales vigentes, sin perjuicio de la pena que le corresponda por los demás delitos que se ocasionen con esta conducta” [10].

Si el llamado de zozobra o terror es provocado mediante llamada telefónica, cinta magnetofónica, video, casete o escrito anónimo, la pena será de dos (2) a cinco (5) años y la multa de cien (100) a quinientos (500) salarios mínimos legales mensuales vigentes. Es decir, que es una definición más amplia de lo que semánticamente define el terrorismo, y que puede dar lugar a diferentes interpretaciones en cuanto a asumir responsabilidades cuando ocurre un acto calificado de terrorista.

Se subrayó, en consecuencia, que para tema de terrorismo, las empresas efectivamente hacen gestiones y acciones específicas, pero las cuales no están consideradas dentro del esquema de integridad señalado por la norma técnica, sino que se hacen a través de análisis de vulnerabilidad y gestión de seguridad física. Incluso en Estados Unidos se maneja en este esquema y tanto la Inгаа como la AGA (asociaciones de transportadores y empresas de gas) han establecido una guía que involucra estos aspectos de forma independiente a la gestión de integridad señalada por Asme B31.8S [7] y API 1160 [8].

En este aspecto, la investigación arrojó como resultado que en Colombia no es claro hasta dónde van las responsabilidades del Estado y las de la empresa, en cuanto a la gestión de integridad del ducto por actos vandálicos o terroristas. Por tal razón, la conclusión es que hay que definir claramente las responsabilidades de las compañías y el gobierno para el manejo de la amenaza a la integridad de líneas por parte del terrorismo, basadas en la competencia técnica, legal y constitucional de ambos.

Del mismo modo, se concluyó que identificar la causa del vandalismo, terrorismo y hurto de combustible es vital para su eliminación. En este aspecto, se sugiere estudiar la aplicabilidad de la estrategia implementada por Ecopetrol (extinción de dominio al derecho de vía) y la norma canadiense CSA Z246.1 (*Security Management Program*) en este tema [11].

Se debe tener en cuenta que para el caso de contratos Bomt (*Build Operate Maintain and Transfer*) en Colombia, los actos terroristas no están en manos del contratante sino que es labor del Estado reconocer el daño causado.

Finalmente, y como respuesta a la discusión realizada, en la propuesta de Norma Técnica Colombiana se escribió a modo de nota: “No es del alcance de esta norma la gestión de control de actos terroristas”.

Áreas de alta consecuencia

Sobre este tema se observó que en países como Estados Unidos y Canadá las áreas de alta consecuencia (AAC) las define la entidad gubernamental correspondiente; por ejemplo, en Estados Unidos los lineamientos los dicta el DOT (US: Department of Transportation), en la sección 49 CFR 195450. En Estados Unidos las AAC son constantemente redefinidas, por lo que la empresa debe estar familiarizada con la actualización de las regulaciones.

En el caso colombiano, el Estado define zonas de alta sensibilidad ecológica, tomadas por las empresas como AAC si por ellas transcurre la línea de transporte. Sin embargo, en otros casos es la empresa la que, de acuerdo con los mecanismos establecidos por el responsable de la integridad, identifica dichas AAC. Por ejemplo, Petrobrás generó un programa para gestión ambiental y de seguridad operacional, considerando aspectos como tipo de fluido, clasificación de áreas de acuerdo con Asme B31.8S [7], caudal e impacto am-

biental. Otras empresas se alinean a lo estipulado en el DOT 49CR [4].

En este sentido, se concluye que Colombia no cuenta con una regulación o incluso con una normatividad que defina o determine las zonas de alta consecuencia por las cuales transcurre una línea de transporte de hidrocarburos.

En vista de la carencia en Colombia de una metodología para identificar AAC, se dispuso en la norma una metodología para tal efecto, como guía de referencia no obligatoria; en ésta se describen los criterios que el responsable de la integridad puede considerar al momento de determinar las áreas de alta consecuencia, y se dice que cada responsable debe definir y documentar una estrategia para establecer nuevas áreas de alta consecuencia y actualizar la clasificación de las ya existentes. Igualmente, se definen qué es una zona de alta consecuencia y los criterios para clasificar una zona como tal. Esta metodología se puede consultar en las actas de las reuniones de los comités de Icontec y Rednil.

Centro de llamada común para emergencias

Al principio se pensó que en el país no había este sistema de llamada común. Se realizó la indagación y se encontró que existía un solo número de llamada nacional para atención de desastres, pero que no se usaba ampliamente ni el público lo conocía. Por tanto, se concluyó que se debían establecer estrategias para el manejo de derecho de vía compartido y estudiar la posibilidad de un centro de llamada común (“one-call” system), con participación de todas las compañías operadoras.

Actualmente, cada compañía tiene su propio número para atención de desastres, pero lo ideal es tener un número único, similar a lo exigido en las regulaciones internacionales. Queda pendiente la manera de gestionar la existencia de este número.

CONCLUSIONES

Se conformó la Red Nacional de Integridad de Líneas (Rednil).

A través de Rednil se formaron dos comités técnicos de Icontec: uno para construir una norma para transporte de gas y otro para transporte de líquidos peligrosos, con el objetivo de estructurar dos normas técnicas colombianas: una para transporte de gas y otra para transporte de líquidos peligrosos (crudo).

Durante el desarrollo de las NTC se discutieron temas relativos a áreas de alta consecuencia, vandalismo-terrorismo y sistema de llamada única de emergencias, como temas altamente prioritarios en la normatividad colombiana.

Como perspectiva de este proyecto, se elaborará posteriormente un esquema de regulación que se pueda aplicar en un país como Colombia.

REFERENCIAS

1. Guerrero Suárez, Fernando & Llano Camacho, Fernando (2003). Gas natural en Colombia, *Revista Estudios Gerenciales*, abril-junio, No. 087. Cali: Universidad Icesi, pp. 115-146.
2. Betancourt Aduen, Félix (2000). El mercado del gas natural en Colombia, proyecto “Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe”. Quito: Olade, Cepal y GTZ, con financiamiento del gobierno de la República Federal de Alemania.
3. Decretos referenciados
4. Anon, DOT 49 CFR, Part 192 y Part 195.
5. Pipeline Safety Improvement Act 2002, H. R. 3609 (2002, November 15). United States Congress.
6. Murray, Alan & Mora, Rafael (2008). *Pipeline Integrity and Security in Companion Guide to the Asme Boiler & Pressure Vessel Code*, vols. 1, 2 & 3, 3rd ed., Chapter 54. Asme International Books.
7. Anon, Asme B31.8S (2004). *Managing System Integrity of Gas Pipelines*. Nueva York, NY: Asme International.
8. Anon, API Standard 1160 (2001, November). *Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines*, 1st ed., Washington, DC: American Petroleum Institute.
9. Actas de las reuniones sostenidas en los comités.
10. Código Penal Colombiano, artículo 343.
11. Anon, CSA Z662-07 (2007). *Oil and Gas Pipeline System*. Mississauga, Ontario, Canadá: Canadian Standards Association.

Mejoramiento de la productividad en la industria manufacturera mediante la aplicación de recubrimientos duros

Improving productivity in manufacturing through the application of hard coatings

GILBERTO BEJARANO GAITÁN¹, JULIO CÉSAR CAICEDO² y JOSÉ MANUEL CAICEDO ROQUE²

1. Grupo de Corrosión y Protección, Universidad de Antioquia, Medellín (Colombia)

2. Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle, Cali (Colombia)

gbejarano@udea.edu.co

Recibido: 20/08/09 Revisado: 30/08/09 Aceptado: 25/09/09

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

Para la fabricación de herramientas de corte y partes de máquinas sometidas a esfuerzos de desgaste se requieren materiales cuya superficie sea modificada, con el fin de mejorar su vida útil y reducir los costos de producción. Una alternativa moderna para el mejoramiento de las propiedades superficiales de los materiales son, por ejemplo, los recubrimientos duros depositados por la deposición física en fase vapor asistida por plasma (PAPVD). En este trabajo se depositaron, caracterizaron y evaluaron en producción recubrimientos multicapa de TiN/ZrN (nitruro de titanio y de circonio), TiN/TiAlN (nitruro de titanio/nitruro de titanio y aluminio) y B₄C/BCN/c-BN (carburo de boro/carbonitruro de boro/nitruro de boro cúbico) depositados sobre diferentes aceros y piezas industriales, con un espesor total promedio de cuatro micrómetros. Se tuvo un incremento sustancial de la vida útil de las piezas recubiertas con dichas multicapas y además se redujeron los costos de producción en las empresas donde se realizaron los ensayos.

Palabras claves: recubrimientos duros, pulverización catódica, multicapas, desgaste.

Abstract

Materials with a modified surface are required for manufacturing tools and machine parts under wear conditions. These improve the life time of the components and reduce the production costs. A modern alternative for improving the surface properties of materials are, for example, hard coatings. These ones are deposited by plasma assisted physical vapor deposition techniques (PAPVD). In this work, multilayer coatings of TiN/ZrN (Titanium nitride/Zirconium nitride), TiN/TiAlN (Titanium nitride/Titanium aluminum nitride) and B₄C/BCN/c-BN (Boron carbide/Boron carbo-nitride/cubic boron nitride) were deposited on different steel and industrial parts with a total thickness average of 4 micrometer. Results showed that lasting of the coated components was increased respect the uncoated ones, and productivity of the companies was improved.

Keywords: hard coatings, magnetrons sputtering, multilayer, wear.

INTRODUCCIÓN

La industria manufacturera utiliza en sus procesos herramientas y piezas que se desgastan rápidamente en condiciones críticas de operación. El desgaste y la corrosión causan millonarias pérdidas, que pueden representar hasta el 25% de los costos de producción, lo cual afecta los niveles de productividad y competitividad de las empresas [1, 2]. Una alternativa para mitigar los problemas del desgaste es la deposición de recubrimientos duros sobre la superficie de éstos. En tal sentido, la deposición física en fase vapor (PVD) de monocapas de CrN, TiN, ZrN, TiAlN, entre otros, se ha utilizado exitosamente [3-7]. Sin embargo, las condiciones de operación cada vez más complejas en los procesos de corte y conformado de los materiales conducen a mayores exigencias tecnológicas de las máquinas y de las propiedades mecánicas y tribológicas de las herramientas y elementos de máquinas. Con base en lo anterior, las investigaciones en el campo de los recubrimientos duros se han centrado en el desarrollo de multicapas nanométricas alternadas de materiales con carácter metálico y otros de perfil cerámico [8-20]. Este trabajo aporta a dichos desarrollos mediante la deposición, caracterización y evaluación en producción de recubrimientos multicapa de TiN/ZrN, TiN/TiAlN y B₄C/BCN/c-BN (carburo de boro/carbonitruro de boro/nitruro de boro cúbico) con un espesor total promedio de cuatro micrómetros. Todos los recubrimientos se depositaron en el Centro Astin del Sena en la ciudad de Cali (Colombia), utilizando un equipo de pulverización catódica balanceado y blancos respectivos de Ti, Zr, Al, B₄C y h-BN (nitruro de boro hexagonal). Después de evaluar las propiedades mecánicas, químicas y microestructurales de las muestras recubiertas [15-20], se recubrieron diferentes piezas y herramientas y se llevó a cabo una evaluación de éstas en condiciones reales de producción, lográndose un incremento apreciable de su vida útil y de la productividad en las respectivas empresas donde se efectuaron las pruebas [19, 21, 22].

EXPERIMENTACIÓN

Todos los recubrimientos se depositaron en el Centro Astin del Sena en la ciudad de Cali (Colombia), utilizando un equipo de pulverización catódica balanceado (*Balanced Magnetron Sputtering*) y blancos respectivos de Ti, Zr, Al B₄C y h-BN (99,9% de pureza). Una repre-

sentación esquemática de la cámara se puede apreciar más adelante (figura 1), en tanto que los parámetros de deposición de los recubrimientos en cuestión se pueden consultar al final [19, 20, 22]. Como sustratos se utilizaron el acero Aisi M2, ampliamente usado en la fabricación de herramientas de corte y de mecanizado por arranque de viruta, el acero para trabajo en caliente Aisi H13, el acero Aisi 4340 y Aisi 5160, empleado comúnmente para la fabricación de partes de máquinas. Antes de la deposición de los recubrimientos, se sometió a los sustratos a una limpieza con alcohol isopropílico, acetona y secados en un horno de convección a 120 °C. Una limpieza final en el interior de la cámara se llevó a cabo, tanto en los blancos como en los sustratos, mediante bombardeo iónico con argón durante quince minutos y a una presión de 50 mbar. Para los recubrimientos de TiN/ZrN y TiN/TiAlN se depositó una capa adherente de 300 nm de Ti, mientras que para el sistema de B₄C/BCN/c-BN se usó una capa de TiN del mismo espesor. Para la deposición de las multicapas se utilizó un sistema de escudos (*shutters*) que se abrían y cerraban mecánicamente y de forma alternada entre los respectivos blancos. El espesor total promedio de los recubrimientos fue de cuatro micras.

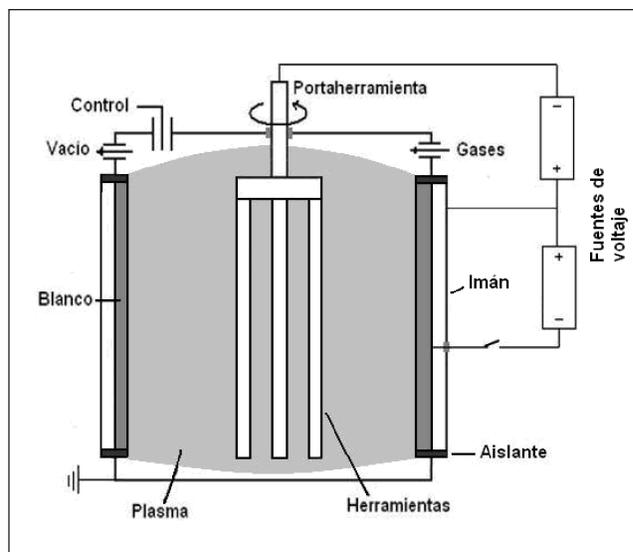


Figura 1. Representación esquemática de la cámara de pulverización catódica con ϕ 50 cm y 60 cm de altura, y cuatro magnetrones circulares de 10 cm de diámetro cada uno.

RESULTADOS DE LA FASE EXPERIMENTAL

Recubrimientos de TiN

Inicialmente se depositó, caracterizó y optimizó un sistema de recubrimiento monocapa de TiN [15, 16], con el cual se procedió a recubrir y evaluar una serie de piezas y herramientas del sector industrial y, de paso, a divulgar en las empresas la tecnología de la pulverización catódica y el potencial de aplicación de los recubrimientos duros. Mediante el recubrimiento de TiN se logró incrementar la dureza superficial de los sustratos de acero Aisi O1 y Aisi M2 de 650 HV a 2.200 HV. Desde el año 2003 hasta el 2006 se recubrieron alrededor de 4.020 piezas industriales de 38 empresas colombianas, proyectándose un ahorro anual en ellas de aproximadamente \$1.150.000.000 (US\$575.000) por concepto de reducción en los costos de mantenimiento y de reposición. A esto se suma una disminución de los tiempos improductivos de alrededor de 20%, equivalente a un ahorro anual adicional cercano a \$4.560.000.000 (US\$2.280.000) [17]. Seguidamente se pueden apreciar los resultados obtenidos en cinco de las 38 empresas donde se llevaron a cabo las evaluaciones de los recubrimientos de TiN depositados sobre diferentes piezas (tabla 1).

Recubrimientos de TiN/ZrN

Para el proceso de corte en la industria papelera se requieren cuchillas fabricadas en aceros especiales de herramienta resistentes al desgaste, que permitan un corte muy fino, sobre todo del papel utilizado en los procesos de fotocopiado para evitar atascos en la máquina. Un primer ensayo de corte se realizó con cuchillas circulares fabricadas en acero Aisi O1 sin recubrir y de otras en acero Aisi 5160 recubiertas con ocho bicapas

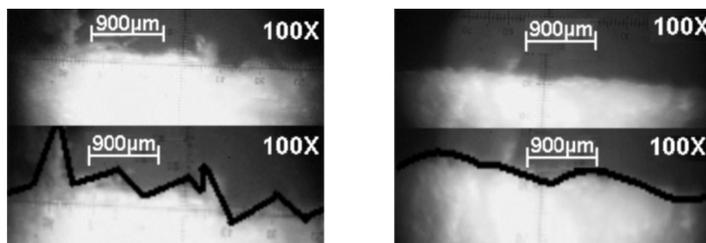


Figura 2. a) Imagen del borde del papel cortado con la cuchilla fabricada en Aisi O1 y b) en acero Aisi 5160 recubierto con ocho bicapas de TiN/ZrN [19].

de TiN/ZrN y cuatro micras de espesor. Las cuchillas recubiertas triplicaron su vida útil y mejoraron de manera sustancial la calidad del corte, debido ante todo a un incremento en la dureza de 7 GPa (acero Aisi O1 sin recubrir) a 29 GPa y una reducción del coeficiente de fricción y de la rugosidad superficial media Ra de un 30%, pues pasó de 5,18 a 3,68 nm [10, 19]. Más adelante se observan sendas micrografías de los cortes realizados (figura 2).

La empresa Agraf S.A., ubicada en la ciudad de Yumbo, convierte actualmente 40.000 toneladas de papel por año, asumiendo unos costos de mantenimiento de sus herramientas y de tiempos improductivos de \$237.600.000 (doscientos treinta y siete millones seiscientos mil pesos). Mediante la aplicación de recubrimientos duros de multicapas nanométricas de TiN/ZrN, TiN/TiAlN_bN y B₄C/BCN/c-BN sobre las cuchillas y contracuchillas, seis de ellas fabricadas en acero nacional Aisi 4340, se pretende incrementar la vida útil de dichas herramientas por lo menos en un 50%, disminuir los costos de mantenimiento de las herramientas y de los tiempos improductivos, y mejorar finalmente los niveles de productividad y competitividad de la empresa. Esto significa una reducción

Tabla 1
Logros alcanzados en algunas empresas del sector metalmeccánico del Valle del Cauca [17]

Empresa	Herramienta	Producción / vida filo sin recubrir	Producción / vida filo recubierto	Ahorro anual (millones de pesos)
Alúmina S.A.	Cuchilla corte de folio	9 toneladas	11,7 toneladas (+30%)	34,3
Sidelva Ltda.	Troquel de lámina	4.000 piezas	5.400 piezas (+35%)	40,6
Induvases S.A.	Troquel de embutición	50.000 piezas	300.000 piezas (+600%)	90,3
Bonlam Andina Ltda.	Cuchilla corte PE	1.100 toneladas	1.907 toneladas (+73%)	44,2
Industrias Lehner S.A.	Fresas para aluminio	100 horas	400 horas (+400%)	18,7
Ahorro total				228,1

de los costos de mantenimiento y tiempos muertos de \$237.600.000 a tan sólo \$118.800.000 (ciento dieciocho millones ochocientos mil pesos) y un incremento de la conversión del papel de 187 toneladas. Esta producción adicional representa para Cartón Colombia S.A., su cliente externo principal, un aumento en sus ventas de \$467.500.000 por año. Este trabajo lo está llevando a cabo el Grupo de Investigación Gidem (Grupo de Ingeniería y Desarrollo de Materiales), del Centro Astin, a través del proyecto “Recubrimientos nanométricos de TiN/TiAlNbN, TiN/ZrN y B4C/BCN/c-BN aplicados a las cuchillas de corte para el mejoramiento de la productividad y competitividad de la empresa Agraf S.A.”, aprobado por Colciencias y registrado con el código 2118-327-18492.

Industrias Estra S.A. es una empresa que pertenece a la cadena productiva del plástico y se dedica a la inyección de piezas y productos plásticos. La empresa posee además un centro de mecanizado, donde se fabrican todos los moldes y piezas necesarios para un funcionamiento estable de sus máquinas inyectoras. Para el mecanizado utilizan, entre otras herramientas, 750 fresas de acero rápido de 1/4”, 3/8” y 1/2”. Para mejorar la durabilidad de estas herramientas de corte se han sustituido por fresas de carburo de tungsteno, últimamente recubiertas con TiN y TiAlN, lo cual genera un costo de \$29.000.000 al año. De acuerdo con los resultados alcanzados [19], y con el fin de reducir los costos de reposición y mantenimiento de las fresas, se llevó a cabo el recubrimiento de algunas de éstas con diez bicapas de TiN/ZrN y su evaluación en producción arrojó los resultados que aparecen posteriormente (tabla 2). Los parámetros de mecanizado para esta evaluación de las fresas recubiertas fueron los siguientes: el material de prueba fue el acero Aisi P20 en estado de suministro, la velocidad de corte 40 m/min, avance de 0,03 mm/

dte-rev, profundidad de 2 mm. El criterio de evaluación fue el volumen de material removido hasta que apareció el primer indicio de desgaste de las fresas.

Estos resultados permiten proyectar un ahorro anual en la empresa de aproximadamente \$15.892.000. Está presupuestado llevar a cabo otros ensayos con un sistema de TiN/TiAlN con cien bicapas, acorde con los resultados experimentales reportados por Bejarano et ál. [20].

Recubrimientos de TiN/TiAlN

El calor generado en los procesos de mecanizado con arranque de viruta y en los de corte a elevadas temperaturas pueden llevar a la pérdida del tratamiento térmico de las herramientas y con ello a una reducción de su dureza, resistencia al desgaste y vida útil. El empleo del TiN en forma de recubrimiento aumenta la resistencia al desgaste, pero por encima de los 600 °C se vuelve inestable, formando con el oxígeno TiO₂, el cual conduce a la delaminación del recubrimiento por la diferencia del volumen molar con el TiN, que produce grandes tensiones de compresión en el sistema [21, 23]. Una estrategia adecuada para incrementar la dureza, la resistencia al desgaste y a la oxidación del TiN consiste en introducir un tercer elemento que sustituya una parte de los átomos de titanio en la red, como por ejemplo el aluminio para formar el compuesto TiAlN. Su utilización a elevadas temperaturas conduce a la formación de una capa compacta de alúmina (Al₂O₃) que protege contra la oxidación progresiva y estabiliza al TiAlN hasta 800 °C [24, 25, 26].

Con base en lo anterior se recubrieron quince buri-les de 4x4x100 mm fabricados en acero Aisi M2, con monocapas de TiN, TiAlN y con 1, 3, 6, 12 y 24 bicapas de TiN/TiAlN con un espesor total promedio de

Tabla 2
Resultados de las pruebas de desgaste de los recubrimientos de TiN/ZrN con diez bicapas, realizada a través del fresado de un acero Aisi P20

Diámetro de fresa	Volumen removido sin recubrimiento (cm ³)	Volumen removido con recubrimiento (cm ³)	Incremento en el rendimiento
8	97,6	108,5	11,1%
10	18,1	31,6	75,0%
12	97,6	130,2	33,3%
	Promedio total		39,8%

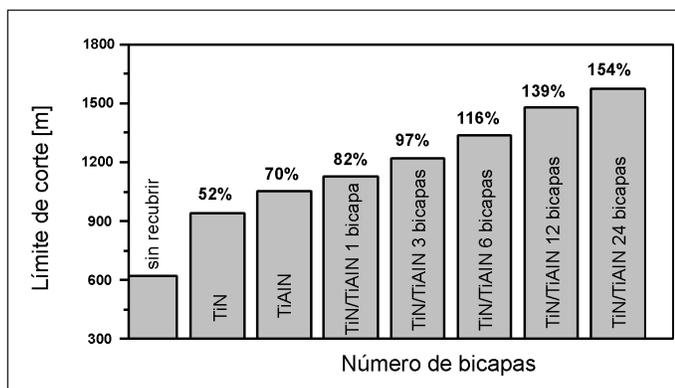


Figura 3. Longitud de corte alcanzada en las pruebas de torneado de los buriles ensayados en función del tipo de recubrimiento y del número de bicapas de TiN/TiAlN [21].

4 micras. Posteriormente se llevó a cabo la evaluación de los buriles mediante ensayos de torneado con las siguientes condiciones de corte: profundidad, 2 mm; avance, 0,2 mm; velocidad de corte, 80 m/min. La pieza de trabajo fue una barra de acero Aisi 8620 de 50 mm de diámetro y una dureza de 3,1 GPa. Las pruebas se realizaron en el Centro de Mecanizado del Astin con un torno Romi-E40 y 10 kW de potencia [21].

Es posible observar la longitud de corte de 1.573 m alcanzada con los buriles recubiertos con 24 bicapas de TiN/TiAlN, que comparada con los 619 m obtenidos con el buril sin recubrimiento, representa un incremento del 154% (figura 3).

Recubrimientos de B4C/BCN/c-BN

En la búsqueda de alcanzar mayores durezas, y con ello mejorar la resistencia al desgaste y el rendimiento de las herramientas, sobre todo en el corte de alta velocidad,

las investigaciones se han concentrado en los llamados recubrimientos superduros con durezas mayores de 3.000 HV, que permiten el mecanizado en seco, mejorando así la productividad en el proceso de corte y disminuyendo el impacto ambiental [27, 28, 29]. Uno de los materiales preferidos es el nitruro de boro cúbico, el cual posee una estructura tipo diamante con durezas superiores a los 4.000 HV, bajo coeficiente de dilatación y conductividad térmica, así como baja reactividad química, lo cual lo hace más atractivo que el diamante para el mecanizado de materiales ferrosos [30-32].

Con el fin de aportar a esta área del conocimiento y compenetrarse con los recubrimientos superduros, se logró depositar por la técnica de la pulverización catódica un recubrimiento de nitruro de boro con un contenido de 85% de c-BN. Posteriormente se desarrolló un sistema multicapas, constituido por 5, 12 y 16 bicapas de carburo de boro/carbonitruro de boro, con una monocapa externa de nitruro de boro cúbico. Como capa adherente se utilizó una monocapa de TiN de 300 nm [22, 33, 34]. Esta estrategia se desarrolló para mejorar la adherencia y tenacidad del sistema multicapa, que permitió la deposición de recubrimientos de 4,8 micras de espesor. Después de depositar y caracterizar el sistema multicapas, se recubrieron varias pastillas de carburo de tungsteno y se llevó a cabo una prueba mediante torneado de una barra de acero Aisi 4340 de 50 mm de diámetro. Las condiciones de corte fueron las siguientes: profundidad, 2 mm; avance, 0,2 mm; velocidad de corte, 220 m/min.

En la figura siguiente se observan la longitud de corte y la eficiencia porcentual alcanzada con los insertos de WC en función del número de monocapas depositadas

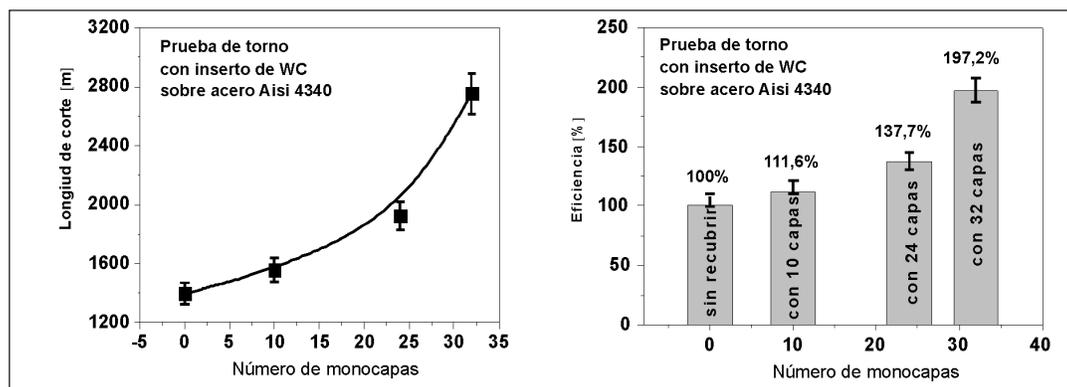


Figura 4. Longitud de corte y eficiencia de los insertos de WC en función del número de monocapas de B4C/BCN/c-BN.

de $B_4C/BCN/c-BN$ y comparadas con el inserto sin recubrir. Se puede apreciar un aumento de la longitud de corte de 1.396 m para el inserto sin recubrir a 2.754 m para el inserto recubierto, lo cual representa un incremento de la eficiencia de un 97,2% (figura 4).

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Una de las estrategias para incrementar la dureza y la resistencia al desgaste de los recubrimientos manteniendo un apropiado nivel de tenacidad es la aplicación de multicapas nanométricas, constituidas por capas alternas de materiales con carácter metálico y de tipo cerámico. Los siguientes factores son fundamentalmente responsables por la elevada dureza de este tipo de recubrimientos [34-41]:

- La inclusión de un tercer elemento de aleación causa una deformación de la red cristalina, la cual obstaculiza el desplazamiento de las dislocaciones. Este es el caso, por ejemplo, cuando se adiciona aluminio o carbono al nitruro de titanio ($TiAlN$, $TiAlC$, $TiAlCN$) o de nitrógeno al B_4C . Aquí se origina una solución sólida del aluminio o del carbono en el nitruro de titanio, donde se ocupan los huecos tetraédricos y octaédricos de su red cúbica, la cual se deforma en estas condiciones, generando un aumento de su dureza y módulo de elasticidad. Si se sigue incrementando el contenido de aluminio o de carbono, y se sobrepasa el límite de solubilidad en el TiN , se forman precipitados nanométricos de las fases de AlN o TiC , que dan lugar a un incremento adicional de la dureza, módulo de elasticidad y resistencia al desgaste.
- Otro importante obstáculo para el desplazamiento de las dislocaciones son los bordes de grano, cuya densidad (número de granos por unidad de volumen) se incrementa de manera sustancial con la reducción de su tamaño. Esto ocurre sobre todo cuando se depositan películas delgadas o recubrimientos multicapas con períodos de orden nanométrico. La conocida ecuación de Hall-Petch describe la relación entre la dureza inicial del recubrimiento y su incremento con la disminución del tamaño de grano [37]:

$$H = H_0 + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Aquí H es la dureza incrementada de la película delgada o del recubrimiento multicapa, H_0 es la dureza inicial del recubrimiento antes de reducir el tamaño de grano, k es una constante del material y d es el tamaño del grano mismo. Por debajo de un valor del espesor de las monocapas de 10 nm, la deformación plástica del recubrimiento tiene lugar por deslizamiento a lo largo de los bordes del grano y no por el desplazamiento de las dislocaciones, proceso éste que requiere mayor energía y por tanto genera un gran incremento de la dureza del recubrimiento. Este es el caso de los recubrimientos en forma de superestructuras.

- El gran número de interfases y bordes de grano de los recubrimientos multicapa con tamaños de grano nanométrico, al igual que los precipitados de fases coherentes, actúan como grandes barreras para el desplazamiento de las dislocaciones y la propagación de micro- y nanofisuras, lo cual además mejora la adherencia y tenacidad del sistema.
- La óptima combinación de propiedades entre metales y cerámicos, cuando se colocan como monocapas alternadas o se depositan en forma de nanocompuestos, permite optimizar la dureza, la resistencia al desgaste, la adherencia y la tenacidad de todo el recubrimiento.

Las multicapas utilizadas en este trabajo de TiN/ZrN , $TiN/TiAlN$ y $B_4C/BCN/c-BN$ presentan casi todas las características antes mencionadas, motivo por el cual se logró incrementar la dureza, la resistencia al desgaste y la eficiencia de las herramientas revestidas de dichos recubrimientos. Estos resultados abren un espacio importante para la futura aplicación de este tipo de materiales, con miras a mitigar los problemas de desgaste y de corrosión del sector industrial de nuestros países y a mejorar el nivel de productividad y competitividad de nuestras empresas, así como también el nivel investigativo, científico y académico de los investigadores, docentes y alumnos en nuestras universidades.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro Astin del Sena regional Valle, al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM), a Colciencias, al Grupo de Técnicas de Bombardeo Iónico de la Universidad Técnica de Darmstadt (Alemania) y al Programa de Sostenibilidad de la Udea por su valioso aporte técnico, logístico y económico.

REFERENCIAS

- [1] Mesa Grajales, D. H. & Sinatora, A. (2003). El desgaste de materiales: enfrentarlo o dejarlo de lado y asumir los riesgos, *Scientia et Technica*, No. 22, pp. 87-91.
- [2] The Economic Effects of Corrosion and Wear (2009, julio). <http://hts.asminternational.org/content/ASM/StoreFiles/ACFAA74.pdf>.
- [3] Zambrano, G., Riascos, H. & Prieto, P. (2003, junio). Multicapas de metal-cerámico-carbono tipo diamante (DLC): un camino para la obtención de recubrimientos superduros. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, vol. XXVII, No. 103, pp. 225-231.
- [4] García, D. & Piratoba, U. (2007, julio). (Ti,Al)N coatings on Aisi 4140, by r.f. sputtering, *Dyna*, No. 152, pp. 181-185.
- [5] Dobrzanski, L.A. & Lukaszkwicz, K. (2007). Mechanical properties of monolayer coatings deposited by PVD techniques, *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 28, Issue 9, pp. 549-556.
- [6] Kim, G.S., Lee, S.Y. & Hahn, J. (2005). Properties of TiAlN coatings synthesized by closed-field unbalanced magnetron sputtering, *Surface and Coating Technology*, vol. 193, pp. 213-218.
- [7] Jaramillo, H.E. & De Sánchez, N.A. (2004). Síntesis y caracterización de recubrimientos de TiN, TiC y TiCN sobre acero Aisi 4340, *Dyna*, No. 144, pp. 93-102.
- [8] Barshilia, Harish C. & Rajam, K.S. (2007, diciembre). Performance evaluation of reactive direct current unbalanced magnetron sputter deposited nanostructured TiN coated high-speed steel drill bits, *Bull. Mater. Sci.*, vol. 30, No. 6, pp. 607-614.
- [9] Paulitsch, J., Mayrhofer, P.H., Münz, W.D. & Schenkel, M. (2008). Structure and mechanical properties of CrN/TiN multilayer coatings prepared by a combined Hipims/UBMS deposition technique, *Thin Solid Films*, 517, pp.1239-1244.
- [10] Braic, M., Braic, V., Balaceanu, M., Pavelescu, G. & Vladescu, A. (2003). Plasma deposition of alternated TiN/ZrN multilayer hard coatings, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 5, No. 5, pp. 1399-1404.
- [11] Li, D.J., Liu, F., Wang, M.X., Zhang, J.J. & Liu, Q.X. (2006). Structural and mechanical properties of multilayered gradient CrN-ZrN coatings, *Thin Solid Films*, 506-507, pp. 202-206.
- [12] Cselle, T., Morstein, M., Geisser, L. & Holubar, P. (2003). Nanostructured coatings for high performance tools, *Werkzeug Technik*, vol. 77, pp. 1-8.
- [13] Mayrhofer, Paul H., Mitterer, Christian, Hultman, Lars & Clemens, Helmut (2006). Microstructural design of hard coatings, *Progress in Materials Science*, 51, pp. 1032-1114.
- [14] De Sánchez, N.A., Jaramillo, H.E., Vivas, Z., Aperador, W., Amaya, C. & Caicedo, J.C. (2008). Fracture resistant and wear corrosion performance of CrN/ZrN bilayers deposited onto Aisi 420 stainless steel, *Advanced Materials Research*, vol. 38, pp. 63-75.
- [15] Bejarano, G., Caicedo, J.M., Baudín, Seth, Devia, A., Arango, P. & Montealegre, G. (2004). Recubrimientos duros sobre herramientas de producción en serie obtenidos por plasma assisted physical vapor deposition (PAPVD) (*magnetron sputtering*), *Revista Colombiana de Física*, vol. 36, No. 2, pp. 325-330.
- [16] Correa, Faber, Rincón, Carlos A., Bejarano, G. & Caicedo, J.C. (2007). Mejoramiento de las propiedades mecánicas de los aceros SAE 5160, 4140 y S600, con recubrimientos multicapas de Ti/TiN preparadas por *magnetron sputtering*, *Revista Colombiana de Física*, vol. 39, No. 2, pp. 597-600.
- [17] Bejarano, G., Narváez, A.E. & Caicedo, J.C. (2006). Production enhancement of metallurgical industry by using thin coatings novel materials, *Revista Innovación y Ciencia*, vol. XIII, No. 3, pp. 130-138.
- [18] Caicedo, J.C., Prieto, P., Caicedo, J.M., Bejarano, G., Balogh, Adam G. & Gottschalk, S. (2005). Deposición de películas de zirconio/nitruro de zirconio en forma de multicapas por *magnetron sputtering* reactivo, *Revista Colombiana de Física*, vol. 37, No. 2, pp. 388-392.
- [19] Caicedo, J.C., Bejarano, G., Gómez, M.E., Prieto, P., Cortez, C. & Muñoz, J. (2007). Nanostructured multilayers of TiN/ZrN obtained by *magnetron sputtering*, *Phys. Stat. Sol. (c)* 4, No. 11, pp. 4127-4133.
- [20] Bejarano, G., Gilberto, Caicedo, Julio C. & Muñoz Saldaña, Juan (2008). Mechanical and tribological properties enhancement of heat treated Aisi 4340 steel by using a TiN/TiAlN multilayer coating system, *Revista Facultad de Ingeniería*, Universidad de Antioquia, No. 44, pp. 36-42.
- [21] Bejarano, G., Caicedo, J.C., Balogh, Adam G. & Gottschalks, S. (2007). Cutting tools performance enhancement by using a TiN/TiAlN multilayer coating system, *Phys. Stat. Sol. (c)* 4, No. 11, pp. 4260-4266.
- [22] Bejarano, G., Caicedo, J.C., Prieto, P. & Balogh, Adam G. (2007). Cutting tool performance enhancement by using a B4C/BCN/C-BN multilayer system, *Phys. Stat. Sol. (c)* 4, No. 11, pp. 4282-4287.
- [23] Carvalho, S., Rebouta, L., Cavaleiro, A., Rocha, L.A., Gómez, J. & Alves, E. (2001). Microstructure and mechanical properties of nanocomposite TiAlN coatings, *Thin Solid Films*, vol. 398-399, pp. 391-396.
- [24] Kim, G.S. Lee, S.Y. & Hahn, J. (2005). Properties of TiAlN coatings synthesized by closed-field unbalanced magnetron sputtering, *Surface and Coating Technology*, vol. 193, pp. 213-218.
- [25] Liu, Z.J., Shum, P.W. & Shen, Y.G. (2004). Hardening mechanisms of nanocrystalline Ti-Al-N solid solution films, *Thin Solid Films*, vol. 468, pp. 161-166.
- [26] Woo, J.H., Lee, J.K., Lee, S.R. & Lee, D.B. (2000). High-Temperature oxidation of TiAlN thin films deposited on a steel substrate by ion plating, *Oxidation of Metals*, vol. 53, Nos. 5-6, pp. 529-537.
- [27] Veprek S., Niederhofer, Moto, K, Nesládek, P., Männling, H. & Bolom, T. (1999, septiembre). Nanocomposites nc-TiN/a-Si3N4/a- and nc-TiSi2 With Hardness Exceeding 100 GPa and High Fracture Toughness, *J. Vac. Sci. Technol. A* vol.17, issue 5, pp. 2401-2420.
- [28] Lattemann, Martina (2004, agosto). Deposition and characterization of covalent bonded mono- and multilayer coatings of the system Si-B-C-N. Tesis doctoral (ISSN 0947-8620). Alemania: Universidad de Karlsruhe, Facultad de Ingeniería Mecánica, Departamento de Ingeniería de Materiales.

- [29] Stan Veprek, Maritza & Veprek-Heijman, G.J. (2007). The formation and role of interfaces in superhard nc-MenN/a-Si₃N₄ nanocomposites, *Surface & Coatings Technology*, 201, pp. 6064-6070.
- [30] Zhang, W.J., Bello, I., Lifshitz, Y. & Lee, S.T. (2003). Recent advances in cubic boron nitride deposition, *MRS Bulletin*, vol. 28, No. 3, pp. 184-189.
- [31] Deng, Jinxiang, Wang, Bo, Tan, Liwen, Cui, Benta & Yan, Hui (2000). Influence of d.c. substrate bias voltage on growth of cubic boron nitride films by radio frequency sputter, *Diamond and Related Materials*, 9, pp. 1779-1781.
- [32] Zhao Young-Nian, Zou Guang-Tian, He Zhi, Zhu Pin-Wen, Wang Xue-Jin & Zhao Bing (1999). Cubic boron nitride films with low stress, *Chin.Phy S. Lett*, vol. 16, No. 2, pp. 155-157.
- [33] Caicedo, J.M., Bejarano, G., Zambrano, G., Baca, E., Morán, O. & Prieto, P. (2005). Cubic and hexagonal boron-nitride (c-BN / h-BN) thin films deposited in situ by r.f. magnetron sputtering, *Phys. Stat. Sol. (b)* 242, No. 9, pp. 1920-1923.
- [34] Bejarano, G., Caicedo, J.M., Baca, E., Prieto, P., Balogh, A.G. & Enders, S. (2006). Deposition of B₄C/BCN/c-BN multilayered thin films by r.f. magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, 494, pp. 53-57.
- [35] Bewilogua, K., Keuncke, M., Weigel, K. & Wiemann, E. (2004). Growth and characterization of thick cBN coatings on silicon and tool substrates, *Thin Solid Films*, 469-470, pp. 86-91.
- [36] Liu, Z.J., Shum, P.W. & Shen, Y.G. (2004). Hardening mechanisms of nanocrystalline Ti-Al-N solid solution films, *Thin Solid Films*, 468, pp. 161-166.
- [37] Komiya, S., Ono, S. & Umezu, N. (1977, septiembre). Hardness and grain size relations for thick chromium films deposited by hallow cathode discharge, *Thin Solid Films*, vol. 45, No. 3, pp. 473-479.
- [38] Wierenga, P.E., Dirks, A.G. & Van den Broek, J.J. (1984, septiembre). Ultramicrohardness experiments on vapour-deposited films of pure metals and alloys, *Thin Solid Films*, vol. 119, No. 4, pp. 375-382.
- [39] Fartash, A., Fullertone, E.E., Schuller, I.K. & Bobbin, S.S. (1991). Evidence for the supermodulus effect and enhanced hardness in metallic superlattices, *Phys. Rev. B* 44, pp. 13760-13763.
- [40] Mayrhofer, Paul, H., Mitterer, Christian, Hultman, Lars & Clemens, Helmut (2006). Microstructural design of hard coatings, *Progress in Materials Science* 51, pp. 1032-1114.
- [41] Bunshah, Rointan F. (2001). Structure/Property Relationships for Hard Coatings, *Handbook of Hard Coatings*, Nueva Jersey: Noyes Publications Park Ridge.

Modelo de evaluación de curvas de niveles de un embalse

Assesment model of level curves in a dam

ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ

Profesor titular del Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co

En este proyecto también participaron los ingenieros Germán Santos G., Héctor Matamoros R. y Octavio Arrieta, del Centro de Estudios.

Recibido: 25/07/09 Revisado: 18/08/09 Aceptado: 30/08/09
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En este artículo se presentan la formulación de una metodología general y un modelo computacional que construye curvas guía de niveles de operación de un embalse, cuya referencia es una demanda constante o variable dada.

Así mismo, a partir de una serie histórica o sintética, que también puede generar el modelo, es posible hacer múltiples análisis que resultan útiles en el proceso de decisiones en la operación de un embalse.

Adicionalmente, el modelo está en capacidad de evaluar la garantía hidrológica de los niveles de un embalse para una demanda establecida –si se considera una nueva hidrología cuya extensión puede ser de uno o varios años–, así como evaluar la bondad de una curva guía, proceso en el cual se determina, para la demanda establecida, qué desembalses adicionales se pueden realizar, período a período, para atender otro propósito.

Finalmente es posible, mediante un proceso de tanteo, fijar una curva guía óptima que encuentra el caudal máximo que se puede suministrar para satisfacer una cierta demanda, de tal manera que no se supere un nivel máximo establecido para la operación del embalse.

Palabras claves: curva guía, nivel de operación, bondad, garantía de suministro.

Abstract

This paper shows a general methodology and a computational model that creates guide curves of operation levels in a reservoir by referencing a given variable or constant demand.

The model was conceived-through a historical or synthetic series, which can also create the model-to make several useful analysis in the process of making decisions to operate a reservoir.

The model is also able to assess the hydrological assurance of the levels in a reservoir, corresponding to a given demand, taking in account a new hydrology, whose duration may be one or more years. Likewise, the model assesses the quality of a guide curve, a process in which what additional quantity of water is necessary to release to serve another purpose should be determined-period by period, for the established demand.

Finally, an optimal guide curve to find the maximum flow that can be supplied to meet a demand that does not overpass the maximum fixed level to operate the reservoir is possible to establish through trial and error.

Keywords: guide curve, level of operation, quality, supply assurance.

INTRODUCCIÓN

En desarrollo del Convenio de Cooperación Inter-institucional 9-07-33100-258-2004, suscrito entre la Empresa de Acueducto y Alcantarillado ESP de Bogotá y el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, se realizó la formulación de una metodología general y un modelo computacional para la elaboración de curvas guía de niveles de operación de un embalse. En este artículo se hace una presentación general de conceptos teóricos sobre operación de embalses y una descripción de los productos desarrollados.

En la primera parte de los estudios se ha evaluado la información hidrológica e hidrotopográfica del embalse de Chuza, con el fin de precisar y definir la información disponible para alimentar el modelo de evaluación de niveles de operación. En la parte hidrotopográfica se han efectuado los análisis correspondientes sobre las curvas actualizadas de superficie y capacidad del embalse de Chuza.

En la segunda parte se ha realizado una recopilación y análisis de la metodología sobre operación de niveles de un embalse, principalmente en la definición de criterios y variables. Este trabajo ha permitido desarrollar y elaborar un programa de computador en el lenguaje Visual Basic, con un formato de ventanas y la plataforma de la hoja de cálculo Excel. El programa elaborado consta fundamentalmente de nueve módulos estructurados de manera secuencial, con los cuales es posible construir, con base en una información hidrológica e hidrotopográfica, una o varias curvas guía de un embalse a nivel mensual, para atender una ley de demanda constante o variable, según el criterio de almacenamiento que se defina. A partir de las curvas guía calculadas, el modelo está en capacidad de evaluar la garantía hidrológica de los niveles de un embalse para una demanda establecida y considerar una nueva hidrología, cuya extensión puede ser de uno o varios años.

En la parte hidrológica se ha incorporado un módulo en el que es posible generar series sintéticas, con el propósito de hacer análisis a partir de una curva guía dada o para construir una nueva curva guía.

OPERACIÓN DE UN EMBALSE PARA SUMINISTRO DE AGUA

Un embalse que hay que operar con el fin de atender demandas para suministro de agua potable de ciudades, riego o producción de energía firme, usualmente se mantiene en niveles tan altos como sea posible, de tal manera que durante los períodos secos o muy secos este volumen de agua almacenada pueda utilizarse y se pueda garantizar el suministro exigido durante todo el tiempo.

Existen muchos factores que hacen que el análisis de la operación de un embalse no sea un problema sencillo, principalmente por las características aleatorias de los procesos hidrológicos, y por la definición y cuantificación de los propósitos de la operación que llevan al planteamiento de un problema de optimización.

En general, se pueden establecer diferentes reglas de operación, pero todas deben incluir las afluencias del embalse y los caudales efluentes que se deben suministrar para atender un cierto propósito en determinados períodos de tiempo. Por ejemplo, entre las políticas de operación de un embalse se acostumbra dividir el volumen útil para atender determinados propósitos u objetivos, mediante su parametrización, simulación u optimización.

Cuando se opera un embalse para suministro de agua potable, es necesario establecer una regla de operación simple que asegure que durante todo el tiempo, independientemente de la hidrología, se entrega la demanda establecida, bien sea constante o variable. Esa regla simple debe ser una curva guía de los niveles del embalse, o curva de referencia, de modo que en la operación del embalse se garantice que, en principio, sus niveles estarán siempre por encima de este nivel mínimo de referencia establecido y con lo cual se aseguraría el suministro establecido.

Por lo regular, en los estudios de operación de un embalse se pueden determinar las descargas óptimas con base en los volúmenes almacenados en diferentes períodos de tiempo, se puede estudiar la operación del embalse para atender variaciones de la demanda, se pueden definir reglas de operación para los periodos de hidrología extrema o diferentes combinaciones de usos conflictivos, como suministro de agua potable y amortiguamiento de crecientes simultáneamente.

Una curva guía de operación de un embalse para suministro de agua potable está conformada por el conjunto de volúmenes mínimos (cotas mínimas del nivel

en el embalse) requeridos (niveles o volúmenes diarios, semanales, mensuales), para que con unas condiciones hidrológicas dadas (una serie histórica o una serie sintética) se asegure con un cierto grado de confiabilidad el suministro y no se presenten déficits en el sistema. En caso de que se lleguen a presentar durante la operación del embalse niveles inferiores a los establecidos por la curva guía, habrá que modificar la operación del embalse (disminuir el caudal demandado, por ejemplo) para evitar su agotamiento en el evento de que se llegara a presentar una hidrología más crítica que aquella con la que se construyó la curva guía.

MÉTODOS DE CÁLCULO DE UNA CURVA GUÍA. CRITERIOS PARA SU UTILIZACIÓN

La metodología que se utiliza para construir una guía o referencia de operación de un embalse se basa en la ecuación del balance hídrico, en el que se deben tener en cuenta los propósitos para los cuales se quiere realizar la explotación.

En el detalle de este proceso metodológico se plantea un modelo basado en el balance hídrico, en el que mediante la suma o resta de las variables involucradas (básicamente hidrológicas y de demandas) se obtendrán, al final de cada período de tiempo fijado y para la serie de datos utilizada, unos niveles en el embalse que se podrán comparar con unos especificados para verificar si se cumple o no con los requerimientos establecidos.

Modelo del balance hídrico

Para el modelo del balance hídrico se utiliza, en cada intervalo de tiempo, la forma discretizada de la ecuación de continuidad. En el procedimiento se calcula, para un período de tiempo, la evolución de los niveles del embalse, iniciando con el primer registro de cada una de las series involucradas. Es decir,

$$V_{t+1} = V_t + \frac{Q_{a_t} + Q_{a_{t+1}}}{2} * \frac{\Delta t}{10^6} - \frac{Q_{e_t} + Q_{e_{t+1}}}{2} * \frac{\Delta t}{10^6} - Pérdidas \tag{1}$$

expresión en la que $t+1$ es el tiempo actual (generalmente un mes), t es el tiempo anterior, y:

V_{t+1} y V_t : volúmenes del embalse en los instantes $t+1$ y t , respectivamente (Hm^3).

$Q_{a_{t+1}}$ y Q_{a_t} : caudales afluentes en los instantes $t+1$ y t , respectivamente (m^3/s).

$Q_{e_{t+1}}$ y Q_{e_t} : caudales efluentes en los instantes $t+1$ y t , respectivamente (m^3/s).

Pérdidas: corresponden a las sustracciones que se presentan en el embalse, como las pérdidas por evaporación en su superficie y que pueden determinarse como

$\frac{A_t E_{t+1}}{10^3}$, expresión en la que A_t (km^2) es el área del embalse para el intervalo t y E_{t+1} (mm) es el valor de la evaporación en la superficie del embalse en el intervalo $t+1$. También se pueden considerar como pérdidas las de la infiltración en el vaso.

Para el proceso operativo se conocen la serie de afluencias, que puede ser la serie histórica de caudales que alimentan el embalse, o una serie sintética; la serie de efluencias, es decir, los consumos o demandas, que debe tener la misma extensión de la serie de afluencias y que puede ser constante o variable, y las pérdidas (evaporación o infiltración) que se van a considerar para el embalse. Se acostumbra iniciar el proceso de cálculo del balance hídrico con los datos más recientes de las series y realizar el proceso hacia atrás, hasta llegar al primer registro de cada una de las series involucradas. Adicionalmente, se debe suponer que al principio de este proceso de cálculo el volumen del embalse es el mínimo posible, es decir, el volumen correspondiente al embalse muerto. Se establece de esta manera que el proceso de cálculo del balance se inicia con la mínima disponibilidad de agua en el embalse, empezando con los datos más recientes de las series de afluencias y demandas. En estas condiciones, y definido un volumen mínimo del embalse para el último período, lo que se determina es el volumen que debe tener almacenado en el embalse en el lapso anterior para satisfacer la demanda del siguiente período, teniendo en cuenta que en ese intervalo llegará al embalse un volumen de agua de acuerdo con la hidrología disponible. Si en el proceso de cálculo se obtiene que el volumen es el volumen mínimo del embalse o uno menor, significa que no es necesario almacenar agua para satisfacer el suministro del período siguiente porque llegó al embalse más agua de la que se requería para satisfacer las necesidades. De acuerdo con lo anterior, el proceso de cálculo establecido obliga a plantear la ecuación (1) de la siguiente manera:

$$V_t = V_{t+1} - \frac{Q_{a,t} + Q_{a,t+1}}{2} * \frac{\Delta t}{10^6} + \frac{Q_{e,t} + Q_{e,t+1}}{2} * \frac{\Delta t}{10^6} + \text{Pérdidas} \quad (2)$$

En la expresión anterior, y para iniciar el proceso de cálculo, V_{t+1} es un volumen mínimo en el embalse (volumen del embalse muerto o un volumen cercano a él) y corresponde al volumen que tendría el embalse al final del período de simulación.

Al completar el proceso de cálculo se obtiene una serie de datos (diarios, semanales, quincenales o mensuales) correspondiente a los volúmenes o niveles que debe tener el embalse, durante todo el período, para garantizar las demandas o suministros de agua establecidos en la modelación. Como se mencionó, el proceso de cálculo se inicia con los datos más recientes disponibles (datos del último año de las series hidrológicas utilizadas) y con un nivel para el embalse que, en principio, puede ser el nivel mínimo de operación. Como en el proceso de cálculo se partió de un nivel mínimo, muy desfavorable, al continuar el proceso de cálculo hacia atrás, y de acuerdo con la hidrología seleccionada, para algunos períodos de tiempo se necesitarán volúmenes almacenados muy altos, y en otros casos, cuando llega mucha agua al embalse, se obtendrán en el proceso de cálculo volúmenes cuyos valores están por debajo del nivel mínimo establecido; en este último caso debe mantenerse tal valor mínimo de volumen definido para continuar con el cálculo, ya que no es necesario disponer de agua almacenada para satisfacer el suministro exigido en el mes siguiente. También es posible que en el proceso de cálculo se obtengan valores por encima del máximo especificado (cresta vertedero de excesos, por ejemplo), en cuyo caso también se debe mantener este valor para continuar con el proceso de cálculo, ya que no es posible almacenar más agua. Si se presenta esta última situación, significa que en este período no se puede garantizar el suministro.

De acuerdo con lo anterior, y para la serie de volúmenes o niveles del embalse finalmente obtenidos en todo el proceso de cálculo, la curva guía de un embalse para abastecimiento se define, para la serie histórica, seleccionando para cada intervalo de tiempo (día, semana, quincena, mes) el valor máximo de volumen embalsado o de nivel del embalse alcanzado (figura 1).

Para la serie obtenida de volúmenes de embalse que satisface una demanda dada, finalmente se seleccionan

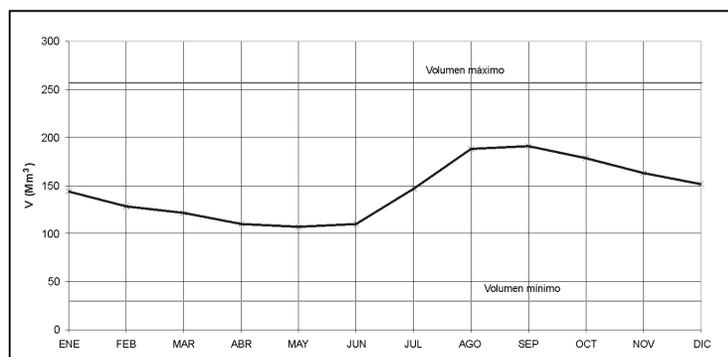


Figura 1. Curva guía de un embalse.

como valores de la curva guía de operación los valores máximos obtenidos para cada período. Por ejemplo, si el período de simulación se realizó mensualmente se tomará el valor máximo obtenido para cada mes. Significa que si se operara el embalse con niveles iguales o superiores a los de la curva guía, la demanda o suministro especificado durante todo el período analizado está garantizado. Por otra parte, también se concluye que para todo el período analizado (n años), si se está garantizando el suministro especificado, la *garantía de suministro* es del 100%, o lo que es lo mismo, se tiene una *confiabilidad* del 100%.

Así, por ejemplo, si se realizara el proceso de cálculo del balance iniciando en cualquier período de cualquier año con el nivel del embalse igual o superior al definido por la curva guía, se observará que durante toda la simulación, para la misma hidrología, se garantiza el suministro y todo el tiempo el nivel del embalse estará por encima del mínimo establecido. El suministro se garantiza el 100% del tiempo.

Que el embalse se pueda operar por encima de estos niveles de referencia calculados y para las mismas condiciones de demanda ya dependerá de la nueva hidrología que se presente período a período (contabilizada mes a mes, generalmente) para el nuevo año o nuevos años de estudio. Si, para una nueva hidrología, el embalse no se puede operar por encima de estos niveles, significa que más adelante es posible no entregar el suministro especificado, pues se corre el riesgo de que el embalse llegue a sus niveles mínimos y no se tenga agua almacenada para dar el suministro especificado, excepto que la hidrología mejore de tal manera que permita que los niveles en el embalse suban e igualen o superen los

de la curva guía, situación poco probable cuando se presenta un ciclo hidrológico seco. En este caso habría que variar la operación del embalse (disminuir el caudal de suministro) y, por tanto, la curva guía de operación del embalse será otra.

Es importante mencionar que una vez definida la confiabilidad o garantía de suministro, se podrán calcular tantas curvas guía como caudales de operación, constantes o variables se definan.

Criterios de garantía de suministro o confiabilidad

Se define la garantía de suministro del 100% o confiabilidad del 100% de una curva guía de niveles, como aquella que garantiza un suministro especificado todo el tiempo. Al iniciar la operación del embalse sus niveles son iguales o superiores a los de esta curva guía. Los niveles máximos con los que se establece la curva guía se obtienen mediante el método del balance hídrico calculado para una serie de datos históricos o generados sintéticamente. Esta serie de niveles o volúmenes máximos se define como la curva guía de operación, con una garantía de suministro o confiabilidad del 100%.

Si se toma como referencia esta definición es posible, entonces, definir otras garantías de suministro o confiabilidades menores del 100%. El procedimiento de cálculo se puede realizar ordenando las series de datos de volúmenes de embalse obtenidas (generalmente series mensuales) de menor a mayor y determinando su correspondiente frecuencia de ocurrencia o probabilidad de excedencia $(n/N+1)$. En esta expresión, n es el número de orden del dato y N es el número total de datos de la serie. Una frecuencia del 100% de un dato, que corresponde al valor máximo de la serie, significa que cuando se tengan en el embalse datos superiores a este valor se asegura el suministro todo el tiempo.

Más adelante se muestran, para un caudal dado constante durante todo el año, las curvas guía típicas para diferentes garantías de suministro (figura 2).

Bondad de una curva guía

Una vez establecida la curva guía de un embalse, de acuerdo con la metodología propuesta, es posible determinar la bondad de dicha curva. Para ello se simula la operación del embalse para el mismo período con el que se obtuvo la curva guía y utilizando la misma serie

hidrológica. Se debe comenzar el proceso de cálculo de volúmenes disponibles en el embalse (ecuación 1) en el inicio del período considerado (primer dato de la serie histórica) con un nivel del embalse igual al establecido en la curva guía y continuando hasta el final de la serie.

En este proceso se debe determinar, para la demanda establecida, qué desembalses adicionales se pueden realizar, período a período, para atender otro propósito. Para ello, en el proceso de cálculo se determina, período a período, el volumen adicional que hay que extraer, tomando como referencia la diferencia entre el nivel o volumen del embalse (que estará por encima del nivel de la curva guía) y el volumen de la curva guía, continuando entonces, para el siguiente mes, con el volumen de la curva guía. En este proceso en general se podrán hacer desembalses adicionales (suministros adicionales a la demanda establecida) en los años húmedos y sólo se podrá satisfacer la demanda en los años más secos. La bondad podrá establecerse como el número de períodos en los que se pueden realizar desembalses adicionales del total de períodos utilizados en la simulación. También podrá determinarse, para un período de tiempo, cuál es el volumen total adicional desembalsado.

Como para este proceso se está utilizando la serie hidrológica con la que se obtuvo la curva guía, se entenderá que sólo una vez, en principio, se llega al nivel mínimo del embalse.

Establecida una curva guía para una serie histórica o sintética de afluencias y para una demanda dada, es posible simular diferentes alternativas de operación del embalse. Así, por ejemplo, es posible simular la operación del embalse para la misma demanda u otra deman-

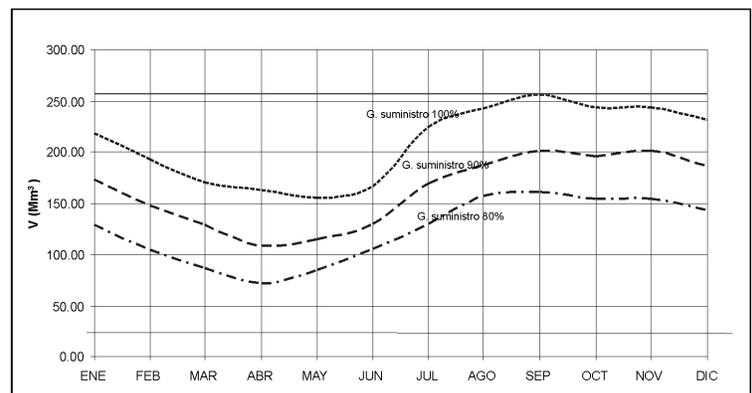


Figura 2. Curvas guía de un embalse para diferentes garantías de suministro.

da incluso variable, pero con otra hidrología y en otro período de tiempo, utilizando el mismo procedimiento anterior y partiendo con el nivel que tiene el embalse para el inicio de la simulación. Se encontrará la bondad de la curva guía para estas nuevas condiciones. En este caso, se podrá establecer además en qué períodos se llega al nivel mínimo del embalse y si la demanda se satisface en todos los períodos. El proceso se podrá realizar con desembalses adicionales o sin éstos.

En este caso se puede determinar como parámetro de evaluación el *porcentaje de períodos sin fallas*, con desembalses adicionales o sin éstos, como una medida de la garantía hidrológica de la nueva serie con respecto a la curva guía adoptada y a la demanda establecida.

Se establece que:

$$\text{PSF}(\%) = 100 * (\text{PS} - \text{PF}) / \text{PS} \quad (3)$$

Donde:

PSF(%) = porcentaje de períodos sin fallos.

PS = número de períodos simulados.

PF = número de períodos fallados.

OPTIMIZACIÓN DE UNA CURVA GUÍA

La utilización de la ecuación del balance hídrico permite establecer una curva guía óptima mediante un proceso de tanteo, en el cual es posible determinar el caudal máximo que se puede suministrar para satisfacer una demanda, de tal manera que para una hidrología dada, la curva guía no supere el nivel máximo establecido para la operación del embalse. Para ello se inicia el proceso de cálculo de la curva guía tal como ya se indicó; para el caudal de demanda establecido con el que se va a calcular la curva guía, se determina cuál es el nivel máximo que deberá alcanzar el embalse. Si este nivel es menor que el nivel máximo establecido para la operación del embalse, significa que es posible suministrar una demanda mayor y, por tanto, es necesario continuar con el proceso de tanteo, hasta que el nivel obtenido para un caudal dado sea el correspondiente al máximo de operación del embalse.

También es posible la optimización automática de una curva guía por medio de su parametrización, simulación y optimización, al representar mediante segmentos de rectas (segmentos de rectas para cada

mes), definidos con las coordenadas de cada uno de los puntos extremos de cada uno de esos segmentos que se toman como variables de optimización. Cada punto extremo se define con una cota de embalse y un tiempo, con lo cual existen $2n$ variables de optimización, donde n es el número de puntos extremos.

GENERACIÓN SINTÉTICA DE CAUDALES

La construcción de curvas guía se realiza por lo general para diferentes hidrologías, que no necesariamente corresponden a una serie histórica.

Por esta razón se acostumbra usar series sintéticas generadas a partir de una serie histórica.

En el estudio se utilizó el modelo de Thomas y Fiering AR (1) para la generación de series sintéticas de caudales. Este modelo es del tipo autorregresivo de orden 1; es decir, una variable (caudal) se explica, al menos en parte, en función de los valores pasados de esa misma variable más un componente aleatorio. Si se quiere modelar un mes x , se necesitan los valores de los meses antecedentes.

El modelo se usa frecuentemente con el objetivo de preservar los momentos de 1° y 2° orden de la serie de tiempo, esto es, la media y la desviación estándar, lo que en algunos casos resulta suficiente con fines de simulación y pronósticos a corto plazo.

MODELO DE COMPUTADOR PARA EL ANÁLISIS DE CURVAS GUÍA DE UN EMBALSE

Teniendo en cuenta los planteamientos teóricos que se han desarrollado y considerando que una curva guía determina unos niveles de operación que aseguran la satisfacción de una demanda para una hidrología dada, se ha considerado que más que establecer una curva guía única para operar un embalse para suministro, es necesario desarrollar un modelo de computador que permita evaluar las características de la curva guía, según se defina una hidrología cualquiera para suministrar una demanda óptima o una demanda dada constante o variable. En consecuencia, y considerando que una curva guía podría ser una referencia dinámica, se ha optado por evaluar diferentes hidrologías, y una vez definida una cualquiera, de acuerdo con unos pronósticos, calcular una curva guía con la cual es posible operar un embalse en un período de tiempo superior a un año. Si

la hidrología cambia el modelo, debe estar en capacidad de establecer una nueva curva guía.

Para satisfacer las anteriores condiciones se creó un modelo de computador utilizando la plataforma de Microsoft Excel de Windows XP. Se realizó el programa usando el módulo de Visual Basic disponible y se estructuró teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

1. Disponibilidad de series hidrológicas históricas o sintéticas. Verificación de la calidad numérica de las series.
2. Cálculo de parámetros estadísticos.
3. Generación de series sintéticas.
4. Disponibilidad de información topográfica del embalse.
5. Cálculo de una curva guía para una hidrología dada.
6. Determinación de curvas guía para un caudal de demanda y para diferentes garantías de suministro.
7. Determinación de la bondad de una curva guía.
8. Evaluación de la operación de un embalse para una hidrología dada y período de tiempo dado, tomando como referencia una curva guía cualquiera.

Establecidas las anteriores condiciones, se estructuró y desarrolló un programa que contiene nueve módulos que a continuación se presentan de manera general (figuras 4 a 12), con el único propósito de mostrar el producto desarrollado. En el *Manual del usuario* se presentan en detalle todos los pasos y condiciones necesarios para su operación.

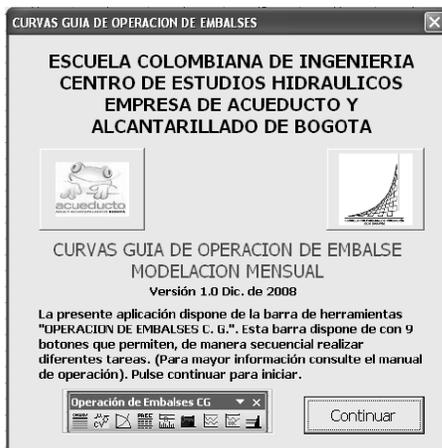


Figura 4. Pantalla principal del programa de curvas guía. Barra de herramientas.

Finalmente, como resultado de la utilización del modelo en las figuras 14 y 15 se presentan las curvas guía para el embalse de Chuza, tomando la serie histórica de afluencias para el período 1967-2007 y para un caudal de suministro de 11,5 m³/s.

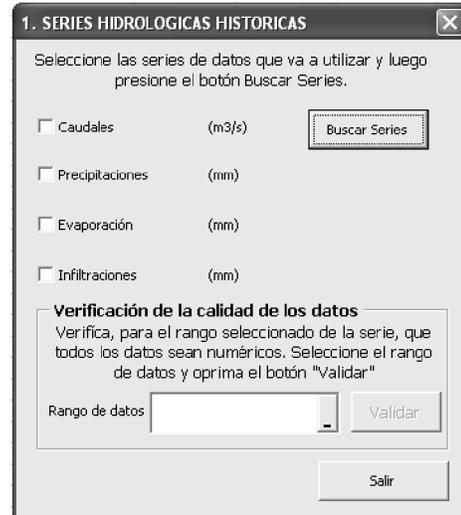


Figura 5. Módulo 1. Series hidrológicas históricas de la barra de herramientas.

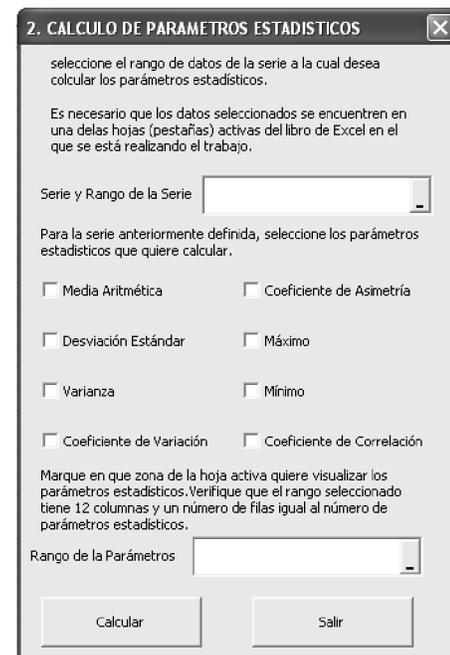


Figura 6. Módulo 2. Cálculo de parámetros estadísticos de la barra de herramientas.



Figura 7. Módulo 3. Características físicas del embalse de la barra de herramientas.

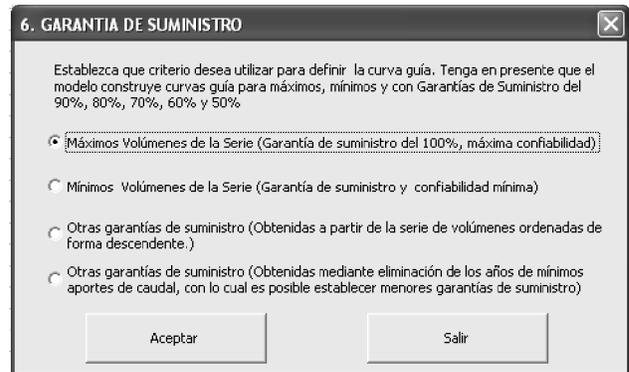


Figura 10. Módulo 6. Garantía de suministro de la barra de herramientas.

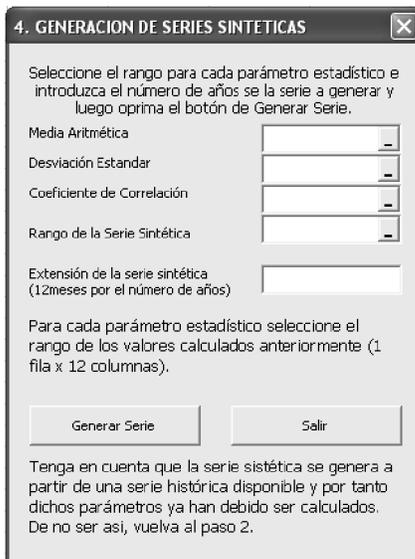


Figura 8. Módulo 4. Generación de series sintéticas de la barra de herramientas.

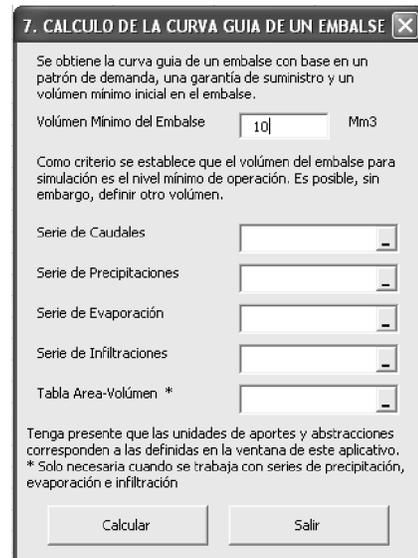


Figura 11. Módulo 7. Cálculo de la curva guía de un embalse de la barra de herramientas.

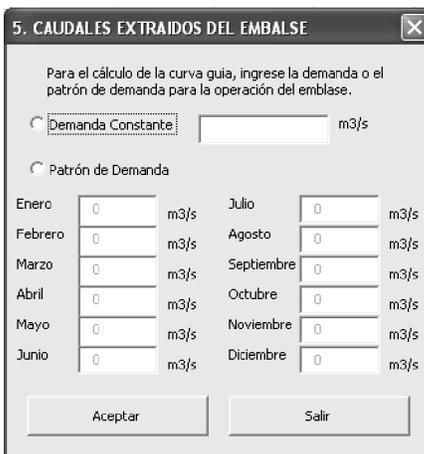


Figura 9. Módulo 5. Caudales extraídos del embalse de la barra de herramientas.

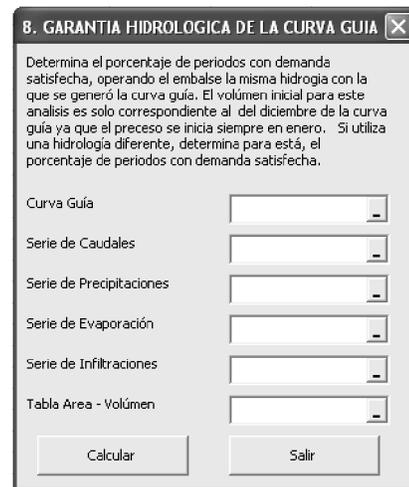


Figura 12. Módulo 8. Garantía hidrológica de la curva guía de la barra de herramientas.

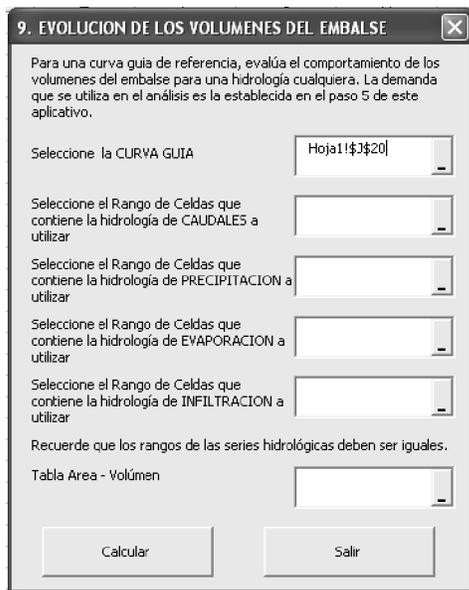


Figura 13. Módulo 9. Evolución de los volúmenes del embalse de la barra de herramientas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la operación de un embalse se requiere mantener unos ciertos niveles mínimos que garantizan siempre la satisfacción de la demanda, de acuerdo con unas necesidades establecidas. Esta condición supone que si el

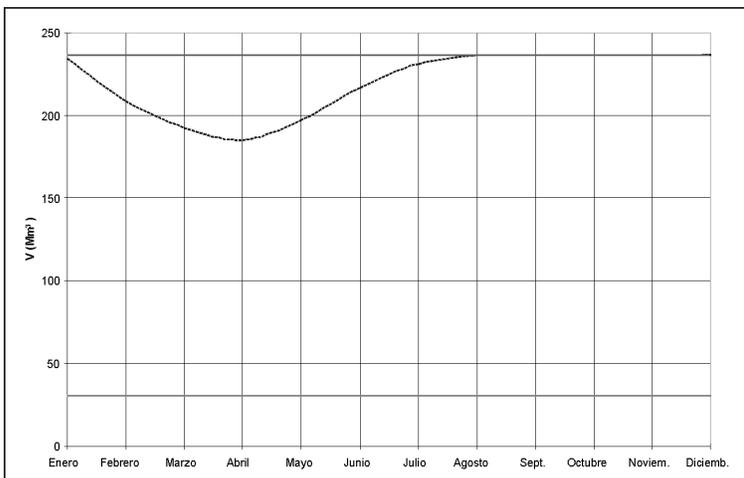


Figura 14. Curva guía para el embalse de Chuza. Serie de afluencias 1967-2007 y demanda de 11,5 m³/s.

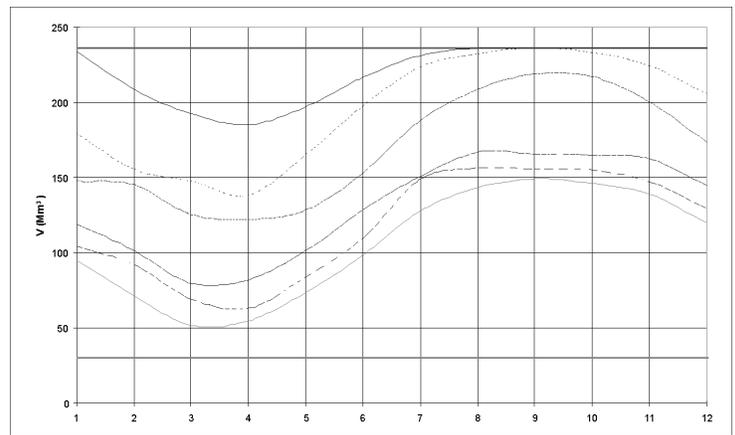


Figura 15. Curva guía para el embalse de Chuza para diferentes garantías. Serie de afluencias 1967-2007 y demanda de 11,5 m³/s.

embalse se opera, teniendo en cuenta la hidrología que se presente durante el período en estudio, por encima de estos niveles mínimos se dispondrá de un volumen de agua adicional que eventualmente se podrá utilizar para otros propósitos.

Estos niveles mínimos de operación establecen lo que en el lenguaje técnico se define como la curva guía de operación de un embalse, la cual se obtiene con los volúmenes mínimos que debe tener el embalse cuando una serie histórica de caudales, que alimenta dicho embalse, debe satisfacer una demanda establecida. Significa, en consecuencia, que la curva guía es una referencia dinámica que dependerá de la serie histórica de caudales y de la demanda establecida.

La aplicación desarrollada por el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería para la EAAB es una herramienta de gestión que le permite al usuario determinar una curva guía de operación de un embalse y realizar una serie de análisis sobre su operación. Es posible utilizar diferentes series hidrológicas, que el modelo también está en capacidad de generar. En la simulación se pueden establecer demandas constantes o variables. También se determinan la garantía de suministro y la bondad de una curva guía. Establecida una curva guía, el modelo puede evaluar, si el embalse se opera de acuerdo con una hidrología cualquiera y para una demanda dada, cuál será su comportamiento con respecto a la curva guía.

REFERENCIAS

1. Chow, Ven Te (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw Hill.
2. Mays, L. & Tung, M. *Hidrosystems engineering and management*. McGraw Hill.
3. Monsalve, Germán. *Hidrología en la ingeniería*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
4. Consejo Nacional de Operación (CNO). Acuerdo 153 del 27 de julio de 2001. Bogotá.
5. Series de afluencias diferentes estaciones, embalse de Chuza. EAAB.
6. Definiciones y conceptos sobre curvas guía (1987). Subgerencia de Planeamiento de la EAAB.
7. Curva área - capacidad embalse de Chuza.
8. Niveles de operación del embalse de Chuza.
9. Curva de regulación de caudales del embalse de Chuza.
10. Gallego, Mónica (2005). Análisis y actualización de la curva guía de operación del embalse de Chuza.
11. Operación de embalses en la sabana de Bogotá (1988). EAAB.
12. Elaboración de las curvas guía para el embalse de Chuza.
13. Universidad Nacional de Colombia (1997) 13. Bogotá: J.D. Salas et ál. (1997). Applied modeling of hydrologic time series. *Water Resources Publications*.
14. Modificación de la curva guía del embalse de Chuza (1987). Subgerencia de Planeamiento de la EAAB.
15. Manual de modelo de operación de embalses (1996). Subgerencia de Planeamiento de la EAAB.

Tecnología de estabilización/ solidificación (E/S) para el manejo de residuos sólidos peligrosos utilizando cemento pórtland

Stabilization/solidification (S/S) technology for hazardous solid waste management with portland cement

EDWINS CHÁVEZ¹, JEISON A. MOSQUERA¹, JANNETH TORRES AGREDO^{2*},
RUBY MEJÍA DE GUTIÉRREZ³

1. Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira edwischavezs@hotmail.com; jam918co@hotmail.com.

2. Docente de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Grupo de Investigación Materiales y Medio Ambiente (GIMM)
jtorresa@unal.edu.co.

3. Profesor titular de la Universidad del Valle, Grupo de Investigación Materiales Compuestos
rudeguti@hotmail.com.

Recibido: Revisado: Aceptado:

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En este artículo se presenta una revisión sobre el tema de la estabilización/solidificación (E/S) de residuos sólidos, utilizando cemento pórtland. Se analizan sus campos de aplicación y su efectividad en el manejo de residuos peligrosos, destacando la importancia del cemento pórtland como agente estabilizante y solidificante, y su uso extendido debido principalmente a los bajos costos de aplicación y bajos niveles de complejidad. Además, en el artículo se incluyen los fundamentos de los ensayos de lixiviación que deben utilizarse para evaluar la eficiencia de la técnica E/S al emplear el cemento pórtland como agente estabilizador.

Palabras claves: estabilización/solidificación, residuo peligroso, ensayos de lixiviación, cemento pórtland.

Abstract

A review of the stabilization/solidification (S/S) technique of hazardous wastes with portland cement is shown in this work. The fields of application and effectiveness in the management of the wastes are presented. The importance of portland cement as a stabilizer and solidifying agent, and its extended use due to low implementation costs and low levels of complexity are emphasized. Additionally, the principles of leaching tests to assess the efficiency of S/S technology with cement portland as a stabilizer agent are also presented.

Keywords: stabilization/solidification, hazardous waste, leaching tests, portland cement.

INTRODUCCIÓN

Los problemas que afronta la humanidad están ligados de manera directa a la forma en que los seres humanos se relacionan para producir los bienes que sustentan su vida. Son esos mecanismos de asociación los que determinan en última instancia qué tipo de bienes y servicios se producen, de qué modo se realiza esa producción y qué materias primas resultan ser las más adecuadas o convenientes para realizar un proceso productivo. De igual manera, a estos procesos están vinculadas la producción de elementos residuales y las decisiones que han de tomarse con respecto al destino final de estos elementos. Es de anotar que la producción de residuos está directamente relacionada con la riqueza de una nación, tanto por cantidad como por calidad [1].

La problemática que suponen en muchas ocasiones los altos volúmenes de producción de estos residuos ha impulsado el desarrollo de nuevas y variadas tecnologías y técnicas para disponerlos, aprovecharlos o eliminarlos en forma tal que no se comprometan el bienestar, la salud de los seres vivos y el medio ambiente. Algunas de estas tecnologías involucran procesos variados, cuya selección depende de la naturaleza y composición de dichos residuos. Entre las alternativas se destacan el reciclaje, el reúso, el aprovechamiento y valorización, y la disposición controlada en rellenos sanitarios [2].

Existe una categoría de residuos cuya disposición final es especialmente compleja, debido a que sus constituyentes son sustancias o elementos químicos que causan daños al medio ambiente y a la salud de los seres vivos: los denominados residuos peligrosos. El riesgo que supone la disposición de tales residuos está relacionado con la posibilidad de que los elementos o compuestos químicos contaminantes migren al exterior a través de procesos de lixiviación, debido a las interacciones que se presentan entre los residuos y los agentes del medio ambiente [1]. Estos residuos, que se generan a partir de actividades industriales, agrícolas, de servicios e incluso de actividades domésticas, constituyen un tema de especial importancia en razón de que el volumen de generación es cada vez mayor con el desarrollo tecnológico y económico de las naciones [2]. Entre las tecnologías de manejo para este tipo de residuos se reporta la de estabilización/solidificación (E/S), la cual, basándose en los numerosos estudios realizados hasta la fecha, puede considerarse una opción viable y segura.

La finalidad de este artículo es presentar brevemente las tecnologías E/S, incorporando específicamente en éstas el uso del cemento p \acute{o} rtland, para lo cual se han recopilado resultados de las investigaciones realizadas al respecto y los correspondientes impactos ambientales positivos inherentes a la tecnología. Paralelamente se describen las principales técnicas utilizadas para la evaluación de la efectividad del proceso.

TECNOLOGÍA DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN (E/S)

En el campo de la gestión integral de residuos peligrosos, la tecnología de E/S se presenta como una alternativa que sobresale por sus características técnicas y económicas [3, 4]. Su objetivo principal es la confinación de los residuos para formar un material monolítico que permita restringir el área superficial expuesta a los agentes del medio ambiente (agua, aire, microorganismos, etc.). La restricción de la movilidad se produce porque el residuo se recubre con un material de baja permeabilidad [1]. La solidificación (S) hace referencia al confinamiento de los residuos en el interior de una matriz sólida, generada a partir de un agente aglomerante, razón por la que casi no existe una modificación química de éstos [1]. Por su parte, la estabilización (E) se refiere a procesos que involucran reacciones químicas que modifican los constituyentes del residuo, lo cual reduce su potencial de lixiviación o capacidad para permitir la movilidad de elementos químicos hacia el medio ambiente.

La E/S es reconocida por la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (Usepa) como un conjunto de procesos efectivos para el reúso o disposición de residuos de difícil manejo, ya que permite el procesamiento de grandes volúmenes de desechos en forma económica y segura [5].

El fundamento de la E/S como proceso es la reducción de la reactividad química o la solubilidad de los residuos por medio de un encapsulamiento físico o de la inducción de cambios químicos, haciendo que el producto final sea fácilmente manejable y con un mínimo riesgo ambiental asociado a la lixiviación de elementos peligrosos [6, 7].

En la categoría de alternativas de reutilización, la industria cementera es una de las que presentan la ma-

por capacidad de absorber residuos de otras actividades industriales [8].

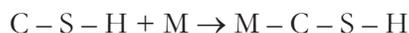
Solidificación mediante la adición de cemento pórtland

Esta técnica consiste en la mezcla del residuo peligroso con cemento [1], el cual se constituye en la matriz del producto final. Aquí el cemento actúa como un material aglutinante o aglomerante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, las cuales permiten la unión de fragmentos minerales entre sí, formando un todo compacto. Tiene la propiedad de fraguar en presencia de agua, a través de un proceso de naturaleza química conocido como hidratación [9].

Los beneficios ambientales relacionados con la técnica de E/S utilizando cemento tienen que ver con dos aspectos dependientes tanto de los materiales que se sometan a ella como de su disposición final. En este sentido, se tienen al menos dos opciones: 1) residuos peligrosos que van a disponerse en un relleno sanitario; 2) residuos peligrosos que van a usarse como materia prima (reutilización y valorización) mediante su adición al cemento.

La E/S utilizando cemento ofrece, además de la encapsulación física de los contaminantes, una fijación química [10]. Para el caso de los metales, el proceso de E/S se lleva a cabo mediante la inmovilización de los iones metálicos (M) a través del gel de silicato cálcico hidratado (C-S-H) [11, 12]. A continuación se señalan los tipos de reacciones que se presentan:

a) Inmovilización por adición de nuevos elementos:



b) Reacción de sustitución, causando la inmovilización de un metal (calcio, en este caso):



La E/S con cemento reporta algunas ventajas, tales como bajos requerimientos técnicos de personal, bajo costo de producción, alta resistencia a la biodegradación, la no toxicidad de los materiales usados y la composición estandarizada del cemento. También se destaca el buen conocimiento de la tecnología del cemento, y que su alcalinidad puede neutralizar residuos ácidos.

Como desventaja se puede resaltar que la presencia de ciertos contaminantes puede llegar a retardar o inhibir la adecuada hidratación del cemento, y con ello afectar el fraguado y el endurecimiento del material [13].

Qiao, Poon y Cheeseman [14] realizaron una investigación sobre la influencia individual de metales pesados, como plomo, cobre y zinc, en la reacción de hidratación del cemento cuando se aplica la técnica E/S. Los anteriores investigadores estudiaron la incidencia de estos contaminantes en las distintas fases encontradas en la reacción, como el aluminato tricálcico (C_3A) y el silicato tricálcico (C_3S), y encontraron que la adición de $Zn(OH)_2$ previene la formación de $Ca(OH)_2$ durante la hidratación de C_3S a edades tempranas, mientras que el $Pb(OH)_2$ y el $Cu(OH)_2$ no tienen incidencia en este aspecto. La presencia de zinc, plomo y cobre puede sustituir al calcio durante la reacción de hidratación de C_3A para producir carboaluminatos de metales pesados. El efecto del recubrimiento producido por el zinc, $CaO(Zn(OH)_2) \cdot 2H_2O$, retarda la reacción de hidratación de las fases C_3A y C_3S , lo cual genera la lixiviación de metales pesados a edades tempranas. Una vez que este recubrimiento se rompe, el proceso de E/S del material se inicia de manera adecuada, previniendo así la lixiviación indeseada de los metales.

Aplicación de la E/S con cemento pórtland

A continuación se mencionan algunos reportes de diversos investigadores.

Tratamiento de residuos con presencia de contaminantes

Un desecho que causa grandes inconvenientes en el tema de la contaminación ambiental son los lodos de las aguas residuales, particularmente por los componentes de carácter orgánico; al respecto, algunos autores [15] estudiaron el comportamiento de estos residuos cuando se aplica la técnica E/S con cemento y bentonita, donde esta última cumple la función de absorber los componentes orgánicos y unirlos químicamente en el residuo para que no tengan contacto con el proceso de hidratación del cemento y lo afecten. La dosificación óptima para obtener una resistencia a la compresión de 350 KPa a 28 días de curado fue de 50% de lodos de aguas residuales, 20% de bentonita y 30% de cemento. Los investigadores señalaron que la adición de bentonita

al cemento permite una mejor estabilidad y solidificación al lodo de agua residual, disminuyendo su toxicidad y lixiviación. Se reporta que con estas características el material obtenido puede utilizarse como materia prima para fabricar bloques y paredes.

Singhal, Tewari y Prakash [16] presentaron los resultados de la aplicación de la técnica de E/S con cemento pórtland para inmovilizar contaminantes como cromo y níquel, provenientes de los lodos obtenidos después de realizar el decapado del acero y antes de iniciar el proceso de galvanización. Existen dos tipos de lodos: aquellos que se encuentran en el fondo de los tanques de decapado, constituidos principalmente por metales y óxidos de metales, y por otro lado están los que provienen de las aguas residuales del decapado, los cuales son neutralizados con cal; los principales componentes de estos lodos son yeso e hidróxidos de metales. Los autores encontraron que a medida que aumentaba el porcentaje de remplazo de cemento por el lodo del decapado la resistencia disminuía, pero los resultados del análisis de lixiviación TCLP (del inglés *Toxicity Characteristics Leaching Procedure*) indicaron que el cemento inmovilizó el cromo y el níquel.

Pardo, Rodríguez y Susa [17] hicieron una evaluación de la efectividad de la E/S para el manejo de lodos de aguas residuales de una industria de galvanoplastia con alto contenido de metales pesados. En este estudio, los investigadores llevaron a cabo ensayos donde el agente aglomerante fue un cemento pórtland IV, en dosificaciones de lodo del 10 y el 20% con respecto a la cantidad de cemento. La retención de metales pesados se evaluó por medio del ensayo estándar de lixiviación TCLP (*Toxicity Characteristics Leaching Procedure*) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Usepa). A partir de los resultados obtenidos se encontró una retención de metales pesados en porcentajes que van desde el 80 hasta el 100%. Los autores mencionan que más importante que la retención de los metales pesados es la conversión de los residuos en productos aptos para ser dispuestos de manera segura en un relleno sanitario. En este estudio también se menciona que los mecanismos asociados a la E/S son dependientes de la relación calcio/silicio (Ca/Si); cuanto menor sea, mayor cantidad de metales pueden retenerse en el CSH. Otro factor clave es el pH, el cual debe ser superior a 10, pues la alcalinidad se requiere para precipitar los iones metálicos como hidróxidos insolubles [18].

Según Silva et ál. [19], otra manera de estabilizar y solidificar lodos obtenidos del proceso de galvanizado consiste en aplicar dos veces la técnica pero con materiales aglutinantes distintos; así se obtiene mayor eficiencia en la retención de metales pesados y se proyecta el desecho como un material reutilizable. El primer paso es mezclar los lodos junto con arcilla y cal para hacer una primera E/S, y posteriormente se muele el sólido obtenido y se realiza una segunda E/S, pero esta vez el material aglutinante es el cemento pórtland con arena. Las dosificaciones utilizadas fueron 3 kg de lodo, 1 kg de arcilla y 2 kg de cal, y para la segunda etapa se usaron 6 kg de cemento y 2 kg de arena. El objetivo de la primera E/S es reducir el potencial de lixiviación en el lodo y la segunda E/S es asegurar la calidad del producto para utilizarlo en forma comercial en la producción de bloques de concreto. Los análisis mostraron que el cromo presente en los lodos redujo su movilidad en la primera E/S; así mismo, metales como Al, Cu, Mn y Zn presentaron menores cantidades que los expuestos por el test industrial de solubilidad realizado al lodo, antes de la aplicación de la técnica E/S.

Romero, Vargas y Padilla [20] evaluaron la eficiencia de la tecnología de inmovilización, para lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales del proceso de electrodeposición de cromo y níquel sobre cobre. Para este caso utilizaron mezclas de cemento/carbonato de calcio en relaciones de 50/50, 75/25, 80/20. El objetivo del estudio fue determinar si el lodo se puede disponer en un relleno sanitario en forma segura. Los investigadores aplicaron el ensayo de TCLP y concluyeron que para todos los sistemas de cemento utilizado se encontró una disminución en el contenido del metal en el lixiviado, incluso empleando seis partes de lodo por cada cuatro partes de material cementante. Encontraron además que el níquel se logró inmovilizar satisfactoriamente a valores por debajo de la norma nacional (Costa Rica), debido tal vez a la formación de hidróxido insoluble. Los autores sugieren reacciones de adición y sustitución con el CSH del cemento hidratado, la posible formación de nuevos compuestos o a la adsorción física de los iones metálicos en los silicatos cálcicos hidratados del cemento.

Otros estudios están relacionados con la inmovilización de arsénico proveniente de plantas de tratamiento de agua, utilizando cemento pórtland como matriz [21]. Los autores reportaron que la inmovilización de

este metal se incrementa con el tiempo de curado del material.

Tratamiento de suelos y lodos contaminados

Jiménez, Consoli y Salvagni [22] presentaron los resultados de la aplicación de la técnica de E/S con cemento pórtland para el tratamiento de un suelo contaminado con residuo oleoso de la industria petrolera. El objetivo del estudio fue realizar un análisis del comportamiento físico del compuesto encapsulado, utilizando para esto ensayos de durabilidad que incluyen ciclos de humedecimiento-secado. De los resultados obtenidos se destaca que la utilización de cemento se ha ido consolidando como una tecnología alternativa por ofrecer resultados rápidos y eficaces en lo referente al tratamiento de suelos contaminados. Los autores afirman que el empleo de esta técnica de tratamiento, en especial si se consideran los suelos finos, requiere estudios previos de dosificaciones en laboratorio para cada tipo de suelo, pues una cantidad exagerada de cemento podría comprometer la utilización de la E/S por motivos técnicos y económicos.

Igualmente, Hago et ál. [23] estudiaron la posibilidad de usar suelos contaminados con derrames de petróleo. En este caso elaboraron bloques de concreto, utilizando el suelo contaminado como remplazo de arena. Los autores determinaron, por medio del ensayo de TCLP, que la concentración de metales y residuos orgánicos no excedió el límite permitido por la normatividad de Estados Unidos. Sugieren que el desecho puede utilizarse hasta en un 60% de remplazo de arena.

Choi, Lee y Park [24] aplicaron la técnica E/S en relaves mineros para reducir la solubilidad en desechos sólidos de elementos tales como arsénico y plomo, entre otros metales. Se prepararon diferentes mezclas manejando una cantidad de cemento entre 5-30% en peso y una relación agua-cemento de 0,5. Después de siete días de curado se reportó que la adición de cemento redujo notablemente la lixiviación de arsénico y otros metales; el análisis se hizo utilizando los ensayos de TCLP y *Synthetic Precipitation Leaching Procedure* (SPLP). Se encontró que la cantidad óptima por adicionar de cemento debe ser de 7,5% mínimo en peso, y se explica que la inmovilización del arsénico y de los otros materiales se debe a la precipitación de $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ y a la absorción de éstos por las fases hidratadas del cemento.

Lampris, Stegemann y Cheeseman [25] reportan la utilización de la técnica E/S para solidificar residuos provenientes del control de contaminantes atmosféricos (*air pollutant control*). Estos desechos se catalogan de peligrosos debido a que tienen alta alcalinidad, presencia de sales solubles como NaCl y KCl, además de metales volátiles como cadmio, plomo, cobre y zinc. Se adicionó cemento a los desechos, en cantidades que oscilaban entre 0-50% en peso, con una relación líquido/sólido de 0,4-0,8. Los reportes mostraron que el desecho no tiene características puzolánicas debido al bajo contenido de alúmina y silicio. Los autores señalan que en presencia de un elevado porcentaje de metales pesados y de sales solubles se inhibe la hidratación del producto y se afecta la integridad de la estructura. Otra desventaja fue la exagerada demanda de agua que dio lugar a un material poroso y a la disminución en las propiedades mecánicas. No se observó la inmovilización del cloro.

Bulut, Ozverdi y Erdem [26] reportaron en sus estudios que el polvo proveniente de la fabricación de ferrocromo contiene un alto porcentaje de material peligroso, compuesto por zinc, níquel, plomo, cadmio y cromo tri- y hexavalente. De éstos, el cromo es el que presenta mayor riesgo ambiental. El rango de adición de cemento fue de 10-50% en peso. Se observó que durante la estabilización de los contaminantes se generan varias reacciones, como neutralización, precipitación, reducción-oxidación (redox), absorción e intercambio iónico, destacando de las anteriores la reacción redox, la cual cumple un papel principal sobre el cromo. Los autores señalan que la presencia de cemento proporciona un medio oxidante para los contaminantes, afectando directamente al cromo; por ello es aconsejable adicionar compuestos reductores, como sales ferrosas (FeSO_4).

Coz [27] presentó un estudio de aplicación de la E/S para el tratamiento de lodos de fundición, los cuales presentan un contenido de metales pesados que exceden los niveles regulados por la Usepa. El estudio se centró en la evaluación ambiental de los residuos antes y después de la E/S. Se utilizaron distintas formulaciones de cal y cemento, acompañadas con las adiciones y aditivos (humo de sílice, carbón activo y lignosulfonato cálcico-magnésico, finos de arenas de fundición y negro de humo de carácter residual). La eficiencia del proceso de inmovilización se evaluó igualmente con el ensayo de TCLP. El autor concluyó que los aglomerantes utilizados (cal y cemento) permitieron ajustar la capacidad

de neutralización ácida en los productos a los valores requeridos para el vertido de los residuos.

Adición de subproductos industriales al cemento

La adición de subproductos industriales al cemento posibilita dos variables claves dentro de la técnica de E/S: por un lado, el confinamiento de un desecho peligroso dentro de una matriz sólida que lo retiene, y por otro, el valor agregado de generarse un sólido a base de cemento, que presta un servicio como material de construcción y mejora de manera sustancial las propiedades del cementante.

Janusa et ál. [28] reportaron el uso de la E/S para inmovilizar plomo en una matriz de cemento pórtland adicionada con bagazo de caña de azúcar. Los ensayos se realizaron sobre muestras que contenían cemento pórtland tipo I, 10 o 15% de nitrato de plomo por peso de cemento y 5% en peso de bagazo tratado. Las muestras se curaron a 7, 14 y 28 días. La movilidad de las sustancias contaminantes se evaluó utilizando la técnica de TCLP. Los investigadores concluyeron que la adición de bagazo reduce la cantidad de plomo lixiviado, en comparación con las muestras que no lo contenían. Se optimiza el diseño de la matriz sólida, y se concluye que el producto final es económicamente viable y seguro para el manejo de residuos peligrosos.

Yin, Wan y Lim [29] hicieron un estudio de viabilidad de la técnica E/S, usando la ceniza de la palma de aceite como remplazo parcial del cemento. La mezcla se aplicó para estabilizar y solidificar hidróxido de níquel. Los mejores resultados mecánicos y de lixiviación se obtuvieron con una mezcla de 35% de cemento, 15% de ceniza de palma y 50% de lodo.

Mijno et ál. [30] reportan la aplicación de la técnica E/S empleando como aglutinante cemento pórtland adicionado con ceniza volante (CV) hasta en un 33,3%. Los desechos tratados fueron residuos de mina y lodos fabricados sintéticamente, simulando lodos de aguas residuales. La técnica se utilizó para inmovilizar metales como As, Cd, Cu, Pb y Zn, contenidos en los relaves y en los lodos. Se reporta que la localización de las trazas de elementos contaminantes depende del desecho que se esté usando; en el caso del lodo sintético, éstos están en el gel o en la fase sulfurosa. Para los relaves, las trazas se encuentran ubicadas con los óxidos de hierro y con

el piroxeno. Se concluye que la adición de CV incrementa la eficiencia en el proceso y reduce los costos de la materia prima para la aplicación de la técnica E/S.

Yin, Mahmud y Shaaban [31] emplearon la técnica E/S en una matriz de cemento con un porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz. En este caso, se buscó inmovilizar plomo proveniente de suelos contaminados. Se realizaron análisis de TCLP, difracción de rayos X (XRD) y resistencia a la compresión no confinada (UCS). Los autores reportaron el buen desempeño obtenido, con respecto al control, de los lixiviados provenientes del sólido formado. Las dosificaciones utilizadas para este estudio fueron de 0-30% de remplazo de ceniza de cascarilla de arroz. Por medio de análisis de XRD se detectó que el plomo, al tener contacto con la matriz de cemento y cascarilla de arroz, forma hidróxido de plomo, el cual se ubica dentro de la estructura de los productos de reacción. Respecto a la prueba de UCS, se destacó el alto nivel alcanzado por la mezcla de ceniza de cascarilla de arroz, cemento y suelo contaminado; el valor obtenido fue superior a los límites que debe cumplir un mortero para poder usarse como material de construcción. Borrachero et ál. [32] evaluaron la adición de catalizador gastado del proceso de craqueo catalítico (FCC), procedente de la industria petroquímica, a morteros de cemento pórtland. La presencia de metales pesados en el FCC lo convierte en un residuo peligroso; no obstante, el alto contenido de aluminosilicatos le confiere las características de una puzolana. Los autores evaluaron las resistencias a flexotracción y compresión sobre probetas de mortero adicionadas con el residuo. En esta investigación, los autores encontraron que el FCC es un material puzolánico muy activo, con la capacidad de reaccionar con el hidróxido de calcio liberado en la hidratación del cemento pórtland y formar compuestos de carácter hidráulico, por lo que concluyeron que la adición de este residuo presenta ventajas desde el punto de vista mecánico y durable, resultados que concuerdan con otros trabajos [33 - 39]. Adicionalmente, se ha encontrado que los materiales elaborados con este residuo (FCC) no son peligrosos, ya que cumplen con los requisitos medioambientales exigidos [40 - 43].

Aplicación de la E/S con otros cementantes

Diversos investigadores han utilizado materiales cementantes, activados alcalinamente, para la inmovilización de residuos.

Shi y Fernández-Jiménez [44] estudiaron la viabilidad de inmovilizar cesio (Cs), el cual es uno de los elementos radiactivos más difíciles de inmovilizar; en este caso utilizaron materiales geopoliméricos como aglutinantes. La evaluación de la lixiviación se llevó a cabo por medio del ensayo de TCLP, siguiendo las normas Ansi/ANS-16.1. En el estudio se encontró que las pastas de cemento pórtland ordinario tuvieron mayor lixiviación que las elaboradas con escoria activada alcalinamente, empleando como activantes NaOH y silicato de sodio. Los autores afirman que la baja fracción de lixivados en el sólido de escoria se debe a que la matriz tiene pocos poros y una baja relación C/S en el gel CSH. Cuando se utiliza ceniza volante activada alcalinamente con NaOH 8M para inmovilizar Cs, se observa que este elemento radiactivo queda encapsulado y unido en el gel alcalino aluminosilicato; en esta forma se disminuye notablemente la fracción de lixivados de la matriz geopolimérica. Los autores afirman que la presencia de soluciones activantes, como hidróxido de sodio y silicato de sodio, permite una estabilización rápida para metales pesados, tales como Pb^{+2} , Cd^{+2} , Zn^{+2} y Cr^{+6} .

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN

Es importante realizar ensayos para evaluar la efectividad de la aplicación de la técnica de E/S, los cuales consisten en análisis químicos y físicos del compuesto tratado. Los análisis químicos se efectúan con base en ensayos de lixiviación y extracción química, en tanto que los ensayos físicos se realizan a través de la verificación de la compactación del material, resistencia a la compresión simple y durabilidad, entre otros [45].

Los ensayos de lixiviación están directamente relacionados con la migración de elementos o sustancias contaminantes, desde la matriz solidificada hacia el medio exterior en la que ésta se encuentre; por tanto, los resultados son dependientes del terreno donde se ubica el residuo [46].

Para seleccionar un ensayo de lixiviación es importante tener en cuenta dos aspectos: el propósito de la técnica de E/S y las condiciones que se van a simular

en cada ensayo. Entre los ensayos de lixiviación que se encuentran de manera más reiterativa en la literatura, para la evaluación de la eficiencia de la técnica de E/S, se tienen:

- *Toxicity Characteristics Leaching Procedure* (TCLP) (Usepa)

Este ensayo se ha diseñado para determinar la característica de toxicidad por lixiviación de un residuo, sea éste líquido, sólido o una mezcla de estas fases. El procedimiento consiste en determinar la movilidad de ciertos constituyentes tóxicos desde un residuo hacia el medio exterior, sean éstos elementos o compuestos químicos, tanto de origen orgánico como inorgánico [47].

Para el caso de muestras sólidas (muestras estabilizadas con cemento), se debe reducir el tamaño de partícula y ponerse en contacto con un fluido de extracción en agitación por un tiempo aproximado de 18 ± 2 horas a 30 ± 2 r.p.m. Después del período de extracción, se realiza una filtración, separando el extracto líquido. Este residuo líquido es el extracto TCLP, el cual se analiza para determinar la concentración de los contaminantes lixivados. Este ensayo se trata de una prueba por bachadas, con lo cual se limita su capacidad para predecir situaciones reales en comparación con la disposición de los residuos. Rihm, Arellano y Sancha [48] señalan al respecto: “El diseño experimental y el escenario supuesto pueden limitar la aplicación de los test de lixiviación a todas las situaciones. Existen varias condiciones ambientales que no pueden reproducirse en este tipo de test, debido fundamentalmente a diferencias en la escala de tiempo de las situaciones de percolación real y experimental”.

- *Synthetic Precipitation Leaching Procedure* (SPLP) (Usepa 1312)

El ensayo de SPLP se diseñó para estimar la capacidad de lixiviación, tanto de analitos orgánicos como inorgánicos presentes en líquidos, suelos y residuos. Este ensayo puede estimar la liberación de metales para residuos expuestos a lluvia ácida.

El procedimiento EPA (*Test Method 1312*) [49], similar al TCLP, consiste básicamente en agitar el sólido que se va a analizar con un fluido, el cual es una mezcla de ácido sulfúrico y ácido nítrico. El proceso se realiza a temperatura y agitación controladas ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$

y 30 r.p.m.) por un tiempo de 18 ± 2 h. El extracto líquido obtenido después de la lixiviación se analiza para determinar si contiene elementos considerados peligrosos, según los parámetros establecidos por la Usepa.

- Ensayo de lixiviación DIN 38414-S4
Este ensayo [50], reconocido oficialmente en Alemania y propuesto por la normatividad de la Unión Europea, se usa para determinar el carácter peligroso de un residuo, y se basa en la utilización de agua desionizada como agente extractor. La mezcla del agua con el residuo se agita durante 24 horas a temperatura ambiente y finalmente se filtra. La parte líquida es el extracto o lixiviado, el cual se analiza por métodos estandarizados, y de acuerdo con la sustancia o compuesto que se desee evaluar.
- Ensayo NEN-7345 (Netherlands Tank Leaching Tests) [51]
En este ensayo se toman las muestras del material E/S y se sumergen en una solución lixivante, que consiste en agua acidificada con ácido nítrico con un pH igual a 4. La pieza debe quedar cubierta por un volumen cinco veces mayor en relación con el volumen de la pieza; se sella el recipiente herméticamente y la solución lixivante debe renovarse ocho veces en un intervalo de tiempo que va desde 6 horas hasta 64 días. Cada vez que se renueva la solución lixivante se toma una muestra para determinar la lixiviación de los metales. La lixiviación total para cada elemento se obtiene como un promedio de las extracciones parciales.
- Prueba Húmeda de Extracción de Residuos (WET; California Code of Regulations) [52]
La prueba húmeda es similar al ensayo de TCLP en el sentido de que utiliza una solución *buffer* de ácido orgánico como líquido de extracción. La solución de extracción húmeda se prepara con una combinación de 0,2 M de solución de ácido cítrico y 4,0N NaOH a pH $5,0 \pm 0,1$. Un litro de esta solución se añade a 100 g de muestra; esta mezcla se somete a agitación continua durante 48 horas. Después de la agitación se mide el pH final y se analiza el extracto.

Además de los procedimientos expuestos ante-

riormente, también se encuentran los ensayos de extracción de la American Society for Testing and Materials (ASTM D 3987) y el ensayo de extracción múltiple (MEP; Usepa Method 1320), entre otros [53, 54].

CONCLUSIONES

La técnica de E/S con cemento pórtland como agente estabilizante y solidificante se está usando en virtud de que los costos de su aplicación son relativamente bajos en comparación con otras técnicas, lo cual se debe fundamentalmente a los bajos niveles de complejidad asociados a ésta. Cabe anotar que la incorporación de adiciones al cemento permite mejorar su efectividad en el proceso. El reciente desarrollo de materiales alternativos, como aquellos producidos por procesos de activación alcalina, se constituyen en una opción de mayor eficiencia comparada con el uso de cemento pórtland.

Un aspecto relevante en la determinación de la efectividad de la técnica de E/S es la verificación, mediante ensayos físicos y químicos, de la máxima retención de elementos o compuestos contaminantes.

REFERENCIAS

- [1] LaGrega, M. D., Buckingham, P. L. & Evans, J. C. (1994). *Hazardous wastes management*. Nueva Jersey: McGraw-Hill.
- [2] Ministerio del Medio Ambiente. República de Colombia (1998). Política para la Gestión Integral de Residuos. Bogotá.
- [3] Valls, S. & Vazquez, E. (2000). Stabilisation and solidification of sewage sludge with Portland cement. *Cem. Concr. Res.*, 30, 1671-1678.
- [4] Collier, N.C., Milestone, N.B., Hill, I.M. & Godfrey, I.M. (2006). The disposal of radioactive ferric floc. *Waste Manage. Res.*, 26, 769-775.
- [5] Usepa (2003). Solidification/Stabilization and its Application to Waste Materials. Technical Resource Document United States Office of Research. EPA530IR-93/012.
- [6] Conner, J.R. & Hieffner, S.L. (1998). The history of stabilisation/solidification technology. *Env. Sci. Technol.*, 28, 325-396.
- [7] Glasser, F.P. (1997). Fundamental aspect of cement solidification and stabilisation. *J. Hazard. Mater.*, 52, 151-170.
- [8] Frías, M., Sánchez de Rojas, M. & Rodríguez, O. (2008). Novedades en el reciclado de materiales en el sector de la construcción: adiciones puzolánicas. II Jornadas de Investigación en Construcción. Madrid, 1415-1424.
- [9] Hewlett, P. C. (1998). *Lea's chemistry of cement and concrete*. Great Britain: Butterworth Heinemann.
- [10] Mayers, T.E. & Eappi, M.E. (1992). *Laboratory evaluation of stabilization/solidification technology for reducing the mobility of heavy metals in New Bedford Harbor superfund*

- site sediment stabilization of hazardous radioactive and mixed wastes*, 2nd ed. Filadelfia: ASTM publication.
- [11] Bhatti, M. (1987). Fixation of metallic ions in Portland cement. Proc. 4th national conference on hazardous wastes and hazardous materials, 140-145.
- [12] Hong, S. Y. & Glasser, F. P. (2002). Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels, part II, role of alumina. *Cem. Concr. Res.*, 32 (7), 1101-1111.
- [13] Shi, C. (2004). Hydraulic cement systems for stabilization/Solification of hazardous, radioactive and mixed wastes, CRC Press.
- [14] Qiao, X.C., Poon, C.S. & Cheeseman, C.R. (2007). Investigation into the stabilization/solidification performance of Portland cement through cement clinker phases. *J. Hazard. Mater.*, B139 238-243.
- [15] Katsioti, M., Katsiotis, N., Rouni, G., Bakirtzis, D. & Loizidou, M. (2008). The effect of bentonite/cement mortar for the stabilization/solidification of sewage sludge containing heavy metals. *J. Cem. Concr. Comp.* 30, 1013-1019.
- [16] Singhal, A., Tewari, V.K. & Prakash, S. (2008). Characterization of stainless steel pickling bath sludge and its solidification/stabilization. *J. Build. Env.*, 43, 1010-1015.
- [17] Pardo, S., Rodríguez, O. & Susa, M. (2005). Evaluación preliminar del proceso de estabilización/solidificación de residuos peligrosos basado en el uso de cemento pórtland. Estudio para lodo de metales pesados. Memos de investigación. Universidad de los Andes, 1-8.
- [18] Shi, C. & Spence, R. (2004). Designing of Cement-Based Formula for Solidification/Stabilization of Hazardous, Radioactive and Mixed Wastes. *Crit. J. Env. Sci. Technol.*, 34, 391-417.
- [19] Silva, M., Mater, L., Souza-Sierra, M., Correa, A., Sperb, R. & Radetski, C. (2007). Small hazardous waste generators in developing countries: use of stabilization/solidification process as an economic tool for metal wastewater treatment and appropriate sludge disposal. *J. Hazard. Mater.*, 147, 986-990.
- [20] Romero, L., Vargas, M. & Padilla, F. (2007). Desarrollo de la tecnología de inmovilización: estabilización/solidificación de desechos peligrosos en Costa Rica. Estudio de caso de lodo de electrodeposición. *J. Avanc. Quím.*, 2 (3), 9-14.
- [21] Jing, Ch., Liu, S. & Meng, X. (2005). Arsenic leachability and speciation in cement immobilized water treatment sludge. *J. Chemosp.*, 59, 1241-1247.
- [22] Jiménez, J., Consoli, N. & Salvagni, K. (2008). Durabilidad de un suelo contaminado y tratado con cemento. *J. Ingen. Constr.*, 23 (3), 163-170.
- [23] Hago, A.W., Hassan, H.F., Al Rawas, A., Taha, R., & Al-Haidi, S. (2007). Characterization of concrete blocks containing petroleum-contaminated soils. *J. Constr. Build. Mater.*, 21, 952-957.
- [24] Choi, W.H., Lee, S.R. & Park, J.Y. (2009). Cement based solidification/stabilization of arsenic-contaminated mine tailings. *J. Waste Manage.*, 29, 1766-1771.
- [25] Lampris, C., Stegemann, J.A. & Cheeseman, C.R. (2009). Solidification/stabilisation of air pollution control residues using Portland cement: physical properties and chloride leaching. *J. Waste Manage.* 29, 1067-1075.
- [26] Bulut, U., Ozverdi, A. & Erdem, M. (2009). Leaching behavior of pollutants in ferrochrome arc furnace dust and its stabilization/solidification using ferrous sulphate and Portland cement. *J. Hazard. Mater.*, 162, 893-898.
- [27] Coz F., Alberto (2001). Comportamiento ambiental de lodos de fundición estabilizados/solidificados. Tesis doctoral para optar al título de doctor en ingeniería Industrial. Santander, España: Universidad de Cantabria.
- [28] Janusa, M., Champagne, Ch., Fanguy, J., Heard, G., Laine, P. & Landry, A. (1998). Solidification stabilization of lead with the aid of bagasse as an additive to Portland cement. *Microch. J.*, 65, 255-259.
- [29] Yin, CY., Wan, A. & Lim, Y. P. (2008). Oil palm ash as partial replacement of cement for solidification/stabilization of nickel hydroxide sludge. *J. Hazard. Mater.*, 150, 413-418.
- [30] Mijno, V., Martin, F., Bollinger, J.C. & Catalan, L.J. (2007). Stabilization/solidification process Comparison of Synthetic Sludge and Volcanogenic Massive Sulphide Tailings, Process Safety and Environmental Protection. *Trans I ChemE, Part B*.
- [31] Yin, Ch., Mahmud, H. & Shaaban, M.G. (2006). Stabilization/solidification of lead-contaminated soil using cement and rice husk ash. *J. Hazard. Mater.*, B137, 1758-1764.
- [32] Borrachero, M., Monzó, J., Payá, J., Mora, Vunda, Velásquez, S. & Soriano, L. (2002). El catalizador gastado de craqueo catalítico adicionado al cemento pórtland: las primeras 48 horas de curado y la evolución de la resistencia mecánica. En Memorias del VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandia, 579-584.
- [33] Velázquez, R. (2002). Aplicaciones del catalizador de craqueo catalítico usado (FCC) en la preparación de conglomerados hidráulicos, estudio de sus propiedades puzolánicas. Tesis de doctorado, Departamento de Ingeniería de la construcción y de proyectos de Ingeniería Civil. España: Universidad Politécnica de Valencia, 577 pp.
- [34] Payá, J., Monzó, J. & Borrachero, M. (1999). Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) an excellent mineral by-product for improving early strength development of cement mixtures. *J. Cem. Concr. Res.*, 29, 1773-1779.
- [35] Payá, J., Monzó, J. & Borrachero, M. (2001). Physical, chemical and mechanical properties of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) blended cements. *J. Cem. Concr. Res.*, 31, 57-61.
- [36] Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. & Velázquez, S. (2003). Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes. *J. Cem. Concr. Res.*, 33, 603-609.
- [37] Zornoza, E., Garcés, P., Monzó, J., Borrachero, M.V. & Payá, J. (2009). Accelerated carbonation of cement pastes partially substituted with fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). *J. Cem. Concr. Comp.*, 31, 134-138.
- [38] Zornoza, E., Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M.V. & Garcés, P. (2009). The carbonation of OPC mortars partially substituted with spent fluid catalytic catalyst (FC3R) and its influence on their mechanical properties. *J. Const. Build. Mater.*, 23, 1323-1328.
- [39] Zornoza, E., Garcés, P., Payá, J. & Climent, M.A. (2009). Improvement of the chloride ingress resistance of OPC mortars by using spent cracking catalyst. *J. Cem. Concr. Res.*, 39, 126-139.
- [40] Furimsky, E. (1996). Review of spent refinery catalyst: environment, safety and utilization. *J. Cat. Today*, 30, 223-286.
- [41] Su, N., Fang, H.Y., Chen, Z.H. & Liu, F. (2000). Reuse of waste catalysts from petrochemical industries for cement substitution. *J. Cem. Concr. Res.*, 30, 1773-1783.
- [42] Sun, D., Li, X., Brungs, M. & Trimm, D. (1998). Encapsulation of heavy metals on spent fluid catalytic cracking catalyst. *Water Sc. Techn.*, 98, 211-217.
- [43] Rattanasak, U., Jaturapitakkul, Ch. & Sudaprasert, T. (2001). Compressive strength and heavy metal leaching behaviour

- of mortars containing spent catalyst. *Waste Manage. Res.*, 19, 456-464.
- [44] Shi, C. & Fernández-Jiménez, A. (2006). Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements. *J. Hazard. Mater.*, B137, 1656-1663.
- [45] Usace (1995). Tractability Studies for Solidification/Stabilization of Contaminated Material. Technical Letter, No. 1110-1-158. Washington: US Army Corps of Engineers, 18.
- [46] Hidalgo, A. & Alonso, C. (2005). Evaluación del impacto medioambiental debido a la lixiviación de productos de base cemento. En Memorias de las Jornadas de Investigación en Construcción. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 571-581.
- [47] EPA Test Method 1311 - TCLP. (1991). Toxicity Characteristic Leaching Procedure. Code of Federal Regulations, 40 CFR part 261, appendix II.
- [48] Rihm, A., Arrellano, J. & Sancha, A.M. (1998). Uso de test de lixiviación para caracterización de residuos del área minera y reflexiones sobre gestión de residuos peligrosos en América Latina. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 26 Aidis 98: 1-8.
- [49] EPA Test Method 1312. (1991). Synthetic Precipitation Leaching Procedure, SPLP. Disponible en <http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/main.htm>.
- [50] DIN 38414-S4. (1984). German standards methods for the examination of water, waste water and sludge; group S (sludge and sediments); determination of leachability by water (S4).
- [51] NEN 7345. (1993). Determination of the release of inorganic constituents from construction materials and stabilized waste products. Standard committee 390 11.
- [52] California Waste Extraction Test. California Code of Regulations (1985). Title 22, Division 30, California Register 85, No. 2: 1800, 78-1800. 82.
- [53] Stegemann, J. A. & Zhou, Q. (2009). Screening tests for assessing treatability of inorganic industrial wastes by stabilisation/solidification with cement. *J. Hazard. Mater.*, 161, 300-306.
- [54] Zhang, J., Liu, J., Li, Ch., Jin, Y., Nie, Y. & Li, J. (2009). Comparison of the fixation effects of heavy metals by cement rotary kiln co-processing and cement based solidification/stabilization. *J. Hazard. Mater.*, 165, 1179-1185.

Dirigibles autónomos no tripulados (AUV)

Unmanned Autonomous Airship (UAV)

JAIME ALBERTO PARRA PLAZAS¹, ARNOLDO EMILIO DELGADO^{2,3}
y WILLIAM APERADOR CHAPARRO^{2*}

1. Ingeniería Mecánica, Universidad Libre, Bogotá, Colombia.

2. Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia.

3. Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

william.aperador@escuelaing.edu.co

Recibido: 09/08/09 Revisado: 29/08/09 Aceptado: 15/09/09

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

Este trabajo se hizo con el propósito de revisar el desarrollo de sistemas de control servovisual para aeronaves no tripuladas, con la finalidad de encontrar en el estado del arte la definición de los parámetros de nuevas investigaciones sobre las estrategias de los modelos y el desarrollo del controlador para la aplicación servovisual.

Palabras claves: visión, control, modelos dinámicos, dirigibles.

Abstract

The object of this paper is to review on the development of servovisual systems for airships unmanned control, to find-in the state-of-the-art-the definition of parameters of new researches on strategies of models and the development of a controller for the servovisual implementation.

Keywords: vision, control, dynamic models, dirigibles.

INTRODUCCIÓN

El presente artículo permite determinar campos de acción de investigación en el control servovisual para aplicaciones de diferente índole, como la vigilancia, identificación, seguimiento de objetos en movimiento o estáticos por medio de vehículos aéreos autónomos no tripulados.

El estudio del control y la fusión con la visión artificial ha permitido un campo de acción de grandes expectativas por cuanto permite el desarrollo de robots autónomos, capaces de ofrecer soluciones a situaciones de riesgo, haciendo más sencillo y seguro el trabajo.

Existe una gran diversidad de soluciones a la problemática tanto del control como del manejo de la servovisión para el desarrollo de los AUV y el camino no está terminado, ya que la necesidad de hacer una mejora constante de los algoritmos y el *hardware* plantea nuevos retos; el desarrollo de sistemas en tiempo real es difícil, debido al procesamiento de los datos, transmisión de la información, perturbaciones del medio ambiente y dinámica del vehículo.

En este análisis se pretende definir un espacio de trabajo para una propuesta de estudio e investigación, así como presentar nuevas teorías a algunas problemáticas parcialmente resueltas y a otras no resueltas.

MODELO DINÁMICO

Los dirigibles tienen un comportamiento basado en la flotación de los cuerpos dentro de un fluido, su dinámica se ha desarrollado con base en las leyes de Newton-Euler fundamentados en la mecánica clásica [1][3] [4][5][6] [7][8][10][16][30][32][50][57].

$$\sum F_{externas} = F_R + F_p + F_D + F_C = Mv \quad (1)$$

Este modelo en general aplica la segunda ley de Newton, donde F_R es la fuerza que contiene la gravedad y flotación, F_p fuerza de propulsión, F_D fuerza de arrastre, M es la matriz de inercia y masa aparente, F_C fuerza debida a los efectos de coriolis y centrípetas, las fuerzas ficticias y aparentes, v aceleración del dirigible; de forma similar, se tiene una ecuación de torques aplicados.

Dentro del modelo dinámico está el efecto de las masas aparentes o añadidas, las cuales ocurren al tener en movimiento un cuerpo dentro de un fluido y se producen a su alrededor debido al desplazamiento

del fluido por el cuerpo; éstas actúan alrededor, y se encuentran relacionadas con la velocidad de desplazamiento, aumentando o disminuyendo la energía cinética. Para algunos investigadores, dichas masas son tenidas en cuenta como una acción externa tanto de fuerzas y momentos sobre el cuerpo, las cuales varían según se acelere y desacelere; se representan por un tensor de 6×6 para un análisis 3D, los cuales se han desarrollado haciendo uso de modelos analíticos y experimentales en túneles de viento [3][7][31][71].

Otros modelos incluyen la fuerza ejercida sobre el dirigible por el viento F_w y T_w torque inducido, los cuales interactúan en todo instante, cuando se hace vuelo en espacios abiertos, modelando estos efectos sobre el dirigible [1][2] [3] [4][5][6][7][8][10][16][30] [50][57].

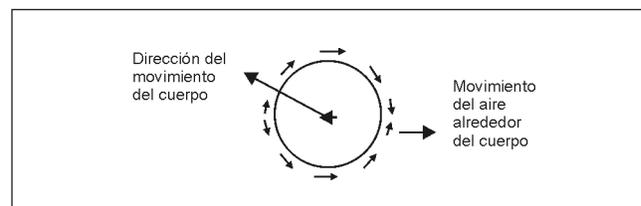


Figura 1. Movimiento del fluido alrededor del cuerpo que genera la masa aparente.

Los modelos tienen en cuenta la influencia del viento en el desplazamiento del dirigible, como consecuencia de la derivación de una fuerza y momento ocasionados por el viento sobre el cuerpo del dirigible. Estos efectos inciden en forma longitudinal o lateral en la dinámica del cuerpo.

En general, estos modelos dinámicos son no lineales, como los desarrollados en la ecuación (1); por tanto, para determinar puntos de operación con estabilidad se recurre a la linealización del modelo y se analiza en estas condiciones de operación.

En el ámbito de la investigación con dirigibles a escala, estos modelos trabajan en recintos cerrados y simplifican el modelo dinámico al no considerar el viento como un factor sobre el cuerpo del dirigible, con el objeto de estudiar el comportamiento y determinar la posición y orientación [2][8].

Otros modelos se han encaminado al desarrollo de dinámicas para el vuelo en grandes alturas [4] para el uso en diversas actividades, como vigilancia, seguimiento, identificación, aplicaciones militares, entre otras; el

modelo se caracteriza por tener que operar sobre condiciones de viento fuerte, a una altura sobre el nivel del mar de más de 20 km, y la velocidad del dirigible cambia constantemente [1] [3] [4][5][6][7][8][16][30][50][57].

Otros modelos dinámicos se orientan al estudio de los dirigibles con dispositivos que permiten modificar la altura de vuelo del dirigible, cambiando la densidad del gas contenido en la carena y el uso de dispositivos para la variación del lastre, los cuales actúan según las condiciones de operación y tipo de vuelo; la dinámica de vuelo se basa en principio en el modelo de Newton-Euler [5].

El modelo se estudia sin restricciones holonómicas, tomando en cuenta que el cuerpo del dirigible es rígido y que se encuentra en un ambiente de aire incompresible e irrotacional; el modelo se basa en los resultados de Kirchhoff, y las ecuaciones de Kirchhoff se basan en la teoría de un fluido potencial, permitiendo la descripción del movimiento del cuerpo; así se aplican las leyes de Newton - Euler.

De acuerdo con Kirchhoff, la energía cinética del fluido, T_f , es una función cuadrática para la velocidad del cuerpo, Ω es la velocidad angular del cuerpo en términos del marco de referencia fijo al dirigible, M_a , J_a , Θ_a son las matrices que contienen las masas, inercia y momento, respectivamente, tanto del cuerpo como la aparente V es la velocidad lineal del cuerpo.

$$T_f = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Omega \\ V \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} J_a & \Theta_a \\ \Theta_a & M_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega \\ V \end{bmatrix} \quad (2)$$

La energía cinética del cuerpo se define como:

$$T_w = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Omega \\ V \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \bar{I}_w + \Delta \bar{I}_w(\Delta m_w) & (\bar{m} + \Delta m_f)(\bar{r}_c + \Delta \bar{r}_c) \\ -(\bar{m} + \Delta m_f)(\bar{r}_c + \Delta \bar{r}_c) & (\bar{m} + \Delta m_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega \\ V \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde \bar{I}_{bd} es el tensor de inercia donde no se tiene en cuenta el llenado y vaciado de los *ballonets* y $\Delta \bar{I}_{bd}(\Delta m_{bi})$ es la variación del tensor de inercia causado por el llenado y vaciado de los *ballonets*. También $(\bar{m} + \Delta m_f)$, el cambio de masa. La variación de lastre se define como:

$$T_{bl} = \frac{1}{2} m_{bl} V_{bl}^T V_{bl} \quad (4)$$

La energía cinética total queda:

$$T = T_f + T_{bd} + T_{bl} \quad (5)$$

Lo anterior hace que cambien r_G y m debido a las modificaciones en el llenado y vaciado de los *ballonets* y lastre.

El hamiltoniano se basa en estudiar el balance de energía, teniendo como resultado ecuaciones que describen el cambio de energía, similares a las de Lagrange, donde como resultado final se tiene la suma de la energía cinética más la energía potencial [5] [74].

Este método es dispendioso debido a la cantidad de integrales que se deben resolver porque son por partes donde se relacionan las variaciones de las velocidades generalizadas, resultando poco llamativo por la exigencia computacional.

Es muy usual para el estudio de los cuerpos deformables y base para el desarrollo de la teoría de control óptimo, además de que se puede obtener al desarrollar el principio de Hamilton en forma extendida, o por medio del principio de D'Alembert; desarrollado de modo que exprese la energía cinética y potencial, permite mejorar el cálculo por no tener que resolver las integrales por partes del modelo de Hamilton, mejorando la posibilidad de no cometer errores de cálculo.

$$M\dot{q} + B\dot{q} + K_d + K\bar{q} = \bar{F}_e + \bar{F}_r - \bar{F}_f \quad (6)$$

Donde B es la matriz de rotación entre marco inercial y marco local de referencia, K_d = dinámica debida a los efectos de coriolis, \bar{F}_R inercia residual en términos del movimiento, \bar{F}_e son las fuerzas externas y torques aplicados al dirigible, con las fuerzas de restauración, y \bar{F}_f representa las fuerzas del fluido [5][19][30].

El modelo de Lagrange [2][13] se desarrolla teniendo en cuenta que es un cuerpo rígido en movimiento y que la atmósfera es estacionaria, con el origen de un sistema de ejes en el centro de flotación.

$$\frac{d}{dt} \{ Mv + Av^w \} + \begin{bmatrix} [\omega] & 0 \\ [U] & [\omega] \end{bmatrix} \{ Mv \} + \begin{bmatrix} [\omega^w] & 0 \\ [V] & [\omega] \end{bmatrix} \{ Av^w \} = Q$$

(7)

v = vector de velocidad

v^w = velocidad del viento

M = masa generalizada

A = matriz de masa adicional

Q = fuerzas externas, momentos a la aerodinámica, flotación, gravedad y flotación.

Donde se hace la simplificación:

- El vuelo se realiza en forma lineal.
- La masa del dirigible es constante.
- El sistema de ejes se encuentra ubicado en un punto sobre la góndola.
- El dirigible es simétrico en el plano XZ y el centro de gravedad y de flotación están dentro de este plano.

La ventaja del lagrangiano frente al modelo de Newton-Euler radica en que no es necesario calcular la aceleración para determinar las fuerzas que actúan sobre el cuerpo; otra diferencia es la forma como se realiza el procedimiento para el desarrollo del modelo del cuerpo. En Newton-Euler se hace un balance de fuerzas y torques separado de la cinemática, y las restricciones de las fuerzas reducen el número de ecuaciones; en cambio, en el lagrangiano se consideran primero las restricciones y la cinemática, de acuerdo con el número de grados de libertad.

Otra diferencia es que el lagrangiano aprovecha la velocidad y las cantidades escalares, en tanto que el modelo de Newton-Euler aprovecha la aceleración y las cantidades vectoriales; como resultado de esto, el modelo de Lagrange permite hacer cálculos en una forma más eficiente y el recurso computacional es menor.

Las investigaciones realizadas toman las ecuaciones de movimiento resultantes y se linealizan, luego de un desacoplamiento del modelo en vuelo longitudinal y lateral; como resultado de esto, se ha obtenido un modelo dinámico lineal que se estudia en forma analítica y experimental, arrojando buenos resultados de vuelo y estabilidad [49][73].

El mejor modelo dinámico que exprese el comportamiento del dirigible está basado en la capacidad de calcularse en forma eficiente y rápida, que permita tener un costo computacional bajo y que el error de cálculo sea pequeño y su implementación sencilla; estas consideraciones ponen en ventaja el desarrollo por medio del principio de Lagrange, debido a que se basa en conocer la velocidad del cuerpo y de sus grados de libertad.

El modelo de Newton-Euler permite calcular las fuerzas y sus reacciones, lo que no permite el modelo

de Lagrange; por esto resulta apropiado para ciertas geometrías, aunque hay que conocer las fuerzas actuantes sobre el cuerpo para efectuar las correcciones necesarias. No es sencillo ver cuál modelo es el más apropiado y sólo depende de las consideraciones del proyecto.

CONTROL DE DIRIGIBLES

Las estrategias de control son diversas y van desde la aplicación del control clásico hasta el desarrollo de modelos de control modernos, los cuales en la medida de su implementación y simplificación de los modelos han tenido buenos resultados, algunos no probados sino simulados, generando enormes expectativas para su experimentación. La búsqueda de un algoritmo de gran estabilidad ha permitido también realizar configuraciones híbridas y emplear algoritmos genéticos o evolutivos.

Un dirigible tiene dos formas de vuelo: longitudinal y lateral. En cada una se estudia cómo varía la dinámica y se busca determinar las trayectorias que sean eficientes, haciendo uso óptimo del consumo de energía, cumpliendo con el objetivo de moverse entre un punto inicial y otro final, buscando determinar la fuerza necesaria para realizar el recorrido, para así lograr una posición en cada momento; esto implica el cálculo en un tiempo mínimo de respuesta para alcanzar un error pequeño de posición. La aplicación de *pontryagain* permite determinar trayectorias óptimas en tiempo que admiten construir trayectorias conectando dos puntos por medio de una infinita sucesión de puntos. El modelo optimal para vuelos laterales se ha desarrollado en simulación y ha tenido buenos resultados; se sigue estudiando la geometría del vuelo lateral en estas condiciones de recorridos óptimos [6].

El proceso de optimizar las trayectorias se fundamenta en hacer uso de la menor cantidad de energía y aceleración; el inicio del análisis de este problema se resuelve con la optimización; se tienen diversas estrategias, basadas en descomposición de valores singulares; planeación fundada en interpolación de polinomios y generación de movimiento; como consecuencia de las simulaciones, se han obtenido buenos resultados con sistemas subactuados. Otros modelos resueltos por medio de soluciones analíticas y numéricas han permitido comparar los resultados y determinar índices de

comparación haciendo simplificaciones de los modelos dinámicos, que explican el buen comportamiento en cada caso [9][10].

El ajuste de la trayectoria de la altitud de vuelo es un problema no lineal, el diseño del controlador se basa en adoptar un esquema donde se maneja la incertidumbre, este modelo no lineal se transforma en un modelo parcialmente lineal, basado en el desarrollo de un controlador por medio del método de Lyapunov. Con esta ley de control, la altitud del dirigible se ajusta en forma exponencial a pesar de tener parámetros de incertidumbre y perturbaciones externas; como resultado de la simulación se muestra que el diseño del control es efectivo [11][12].

Para el desarrollo del ajuste de la trayectoria, otro autor caracteriza las hélices con la condición de tener una curva constante en la hélice y torsión, basado en ajustar el vuelo con un movimiento predefinido y minimizar el tiempo, en condiciones reales [33].

El problema se puede resolver por medio de la predefinición de puntos a una altitud y velocidad dadas; el error de la trayectoria presenta dos estrategias: una basada en control H_∞ y otra basada en un PI; se realiza una comparación por medio de simulación y en ambos casos se tienen buenos resultados, mostrando de manera marcada un mejor desempeño con el controlador H_∞ , que da una respuesta muy superior. Esta simulación se ha tenido en cuenta en ambos modelos, con viento y sin viento [54] [59].

Otra estrategia para determinar la mejor trayectoria y cuyo ajuste se basa en aplicar lógica difusa tiene por objeto actuar sobre el modelo en tiempo real en los recorridos, sobre la velocidad de AUV y sobre la posición relativa y orientación; esta técnica, unida a la cinemática y dinámica, promete buenos resultados en modelos reales, mostrando eficiencia cuando se aplica a recorridos con curvas y a vehículos terrestres. Es una opción interesante para aplicarla en AUV aéreos [67].

Los modelos dinámicos en general definen los parámetros mínimos y necesarios para el desarrollo del sistema de control; entre los modelos más trabajados y clásicos, como el PID haciendo uso del tipo Siso con dinámica de lazo abierto, la ley de control tiene en cuenta la altura, longitud y latitud, información que es suministrada por el planeador de la trayectoria, incluyendo la velocidad del viento, donde la trayectoria se optimiza con el ángulo de vuelo y la velocidad absoluta;

los resultados obtenidos son buenos. Se examina el caso de la dinámica en lazo cerrado, donde se encuentra una pérdida de estabilidad con base en un análisis estático neutral; como resultado se puede decir que no es bueno el modelo desarrollado [4][19][59].

Otro modelo de PID consiste en hacer el control de variables como la distancia relativa y el ángulo relativo de vuelo con respecto al eje Z, controlando el desplazamiento y el ángulo de vuelo, el cual se implementó en un experimento real; los resultados fueron que de 20 pruebas, 13 fueron acertadas y 7 fallaron, debido a dificultades de reconocimiento en la posición, mostrando un resultado aceptable debido a las dificultades de reconocimiento [58].

Al hacerle una linealización al modelo se puede tener una representación en espacio de estados $\dot{x} = Ax + Bu$, donde x es el vector de estado, u la señal de control, A la matriz de estados y B la matriz de la señal de control, se puede plantear una ley de control especificada como

$$u = K_p u_m + K_i \int (u_{ref} - u_m) dt + K_d \frac{d u_m}{dt} \quad (8)$$

Donde u_{ref} es la señal de referencia y es la variable controlada, las ganancias K_p , K_i y K_d se calculan con el análisis de realimentación de estado y aplicando técnicas de asignación de polos.

De acuerdo con la formulación de control se pueden escoger PI, PD y PID, con el objeto de desarrollar un controlador; se busca controlar la velocidad, altitud y control de dirección en el plano horizontal en cada caso, obteniendo una ley de control [27][29]:

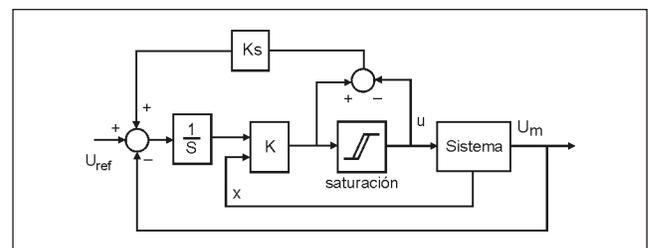


Figura 2. Ejemplo del modelo de bloques de un PID.

$$T(s) = K_p v_a + \frac{K_i}{s} (v_r - v_a) \quad \text{Velocidad (9)}$$

$$\delta_\theta(s) = K_p \varpi + \frac{k_i}{s} (\varpi_r - \varpi) + k_d \theta + k_{2d} q \quad \text{Altura (10)}$$

$$\delta_g(s) = K_p \Psi + \frac{K_i}{s} (\Psi_r - \Psi) + K_d \frac{d\Psi}{dt} \text{ Dirección (11)}$$

En el caso de la velocidad por medio de la simulación, se obtiene una respuesta buena y la velocidad sigue la consigna de referencia v ; el resultado es una señal estable en el lazo cerrado.

En la parte del controlador de altura se obtiene que sigue una referencia z_r con velocidades bajas; como resultado de la simulación, se mantiene en una zona válida para los modelos.

Respecto al control de dirección, se mantiene estable en bajas velocidades y la perturbación es baja por el comportamiento lineal del sistema en la fase de vuelo de crucero; como conclusión, se tiene dificultad al realizar un desarrollo en tiempo real debido a la saturación del regulador. Los tres reguladores que actúan al tiempo se centran en la fase de vuelo de crucero, pero muestran buen desempeño en otras condiciones donde los parámetros son variables.

Otros reguladores se orientan al control predictivo GPC (*Generalized Predictive Control*), el cual se fundamenta en el uso del modelo dinámico y así permite predecir las salidas futuras del proceso en un instante dado; su aplicación se hace sobre el control de velocidad, control de altitud y control de dirección en el plano horizontal. Para realizar el cálculo del control se aplica según el criterio por minimizar y el desplazamiento del horizonte para la recuperación en cada paso de la señal de control; así, se obtiene que los diferentes controles llevan el sistema a la fase de vuelo, aun si el punto de inicio es diferente; para cada caso se realiza una ley de control.

Los resultados obtenidos para este modelo de control en las diferentes variables indican que el control de velocidad, comparado con el PID, presenta un sobrepaso más grande en comparación con el PID debido a la sintonización, la cual ejerce un mayor trabajo al llevar más rápido el sistema al valor de referencia.

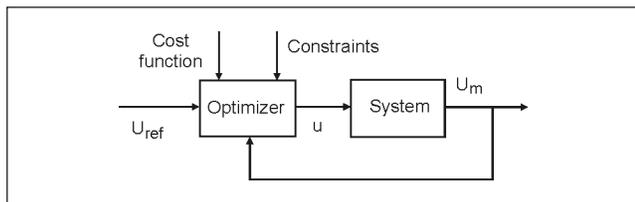


Figura 3. Ejemplo de un modelo de bloques de controlador tipo GPC.

En el control de altitud se muestra que las curvas de error en estado estable para diferentes puntos de operación son estables, cumplen con los objetivos del diseño y mantienen el sistema en la región lineal.

Con respecto al control de dirección del plano horizontal se tiene una exigencia en los actuadores mayor que la presentada en el PID, situación que es importante para lograr la estabilización del sistema en un menor tiempo que el empleado en el PID; como resultado, se tienen acciones de control más fuertes sobre la dinámica del sistema [27].

Hay otros reguladores de tipo no lineales de primer orden que se aplican a modelos de tipo Siso (*Single Input-Single Output*) y NLTI (*NonLinear Time Invariant*) o modelos con variaciones paramétricas lentas aplicados a modelos reducidos, los cuales se linealizan alrededor de un punto de equilibrio [29].

Con la planeación de la trayectoria del dirigible se busca mejorar de manera eficiente el uso de la energía disponible y que el control garantice que se cumplan estas condiciones con el controlador. Este tipo de regulador se aplica a modelos con variaciones lentas y que se pueden simplificar si se aplica a sistemas no lineales

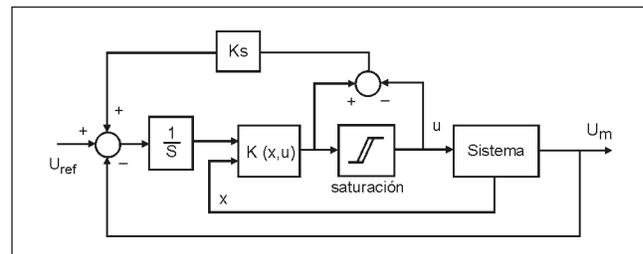


Figura 4. Ejemplo de un modelo de controlador tipo Siso-NLTI.

en la vecindad de un punto de equilibrio del sistema. Los controladores desarrollados tienen el siguiente resultado: para el regulador de velocidad se obtiene una respuesta similar a la del control PID, dando como resultado ante ruido una respuesta muy buena y manteniendo la estabilidad; respecto al control de altitud, tiene un resultado similar al PID, donde muestra un buen desempeño al seguimiento de la señal de referencia; por último, con el regulador de vuelo horizontal mantiene un buen comportamiento en la zona lineal. Como resultado general, estos reguladores cumplen con los objetivos y, por tanto, son aceptables [27].

El control de la altitud es un problema que produce incertidumbre y perturbaciones externas. Este problema puede ser modelado de tipo MIMO con un modelo no lineal con incertidumbre; el modelo de control robusto se adopta basado en las altas regiones de incertidumbre. Haciendo uso de las entradas y salidas con retroalimentación se aprovecha la linealización y por medio del método de Lyapunov se desarrolla una ley de control que garantice el ajuste de la salida deseada del sistema y que sea en forma exponencial.

Después del desarrollo del modelo matemático de la altura y seleccionando las variables de estado, como $x = [v, \psi, \phi, p, q, r]^T$, donde p, q, r son las velocidades angulares en O_x, O_y, O_z respectivamente, y v, ψ, ϕ el giro en cada uno de los ejes; la salida $y = [y_1, y_2, y_3]^T = [v, \psi, \phi]^T$, se obtiene la siguiente ecuación de estado:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + \Delta f(x) + [G(x) + \Delta G(x)]u \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (12)$$

$x \in \mathbb{R}^n$ en el sistema del vector de estado, u y $y \in \mathbb{R}^m$ son las entradas y salidas, respectivamente; $\Delta f(x)$ y $G(x)$ representan el sistema de incertidumbre; $G(x)$ es un campo vectorial y $h_i(x)$ es una función escalar, el cual se linealiza obteniendo el modelo de entrada/salida dinámica.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + G(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (13)$$

Esto permite la construcción de un controlador de tipo robusto, considerando la incertidumbre; como resultado, se ajusta la altitud y se obtiene un control continuo con la presencia de componentes de incertidumbre y perturbaciones externas.

El diseño del controlador robusto es necesario por las variaciones del error; minimizar las perturbaciones del ambiente y las características del modelo no lineal, y tener una buena estabilidad, llevan al desarrollo de este controlador de altura. La simulación tiene buenos resultados y el controlador un desempeño adecuado en forma continua, con perturbaciones e incertidumbres [11].

Se estudian estrategias de control diversas entre las cuales se tienen el control H_∞ , controlador de Kharitonov y PI, comparando estos resultados de cada modelo entre sí. El controlador de Kharitonov se basa en

desarrollar un conjunto de 16 funciones de transferencia y determinar un controlador robusto y estable en lazo cerrado con controlador de primer orden; presenta estabilidad asintótica de la guiñada de dirigible y tiene la siguiente forma:

$$C(s) = \frac{K\alpha(Ts + 1)}{\alpha Ts + 1} \quad (14)$$

Los parámetros K, α, T son los que determinan la estabilidad asintótica en un intervalo de familias de plantas; el modelo obtenido es éste:

$$\frac{r(s)}{\delta(s)} = \frac{(0,0607s^3 + [-0,00007, 0,0107]s^2 + [0,177, 0,180]s + [0,0051, 0,0216])}{(s^4 + [0,373, 0,517]s^3 + [3,02, 3,08]s^2 + 1,12s + [-0,1, 0,0466])} \quad (15)$$

El modelo de H_∞ se basa en desarrollar un controlador con buena estabilidad de guiñada, se considera y reducción a la sensibilidad y una estabilidad robusta en lazo cerrado, y se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$S(s) = \frac{1}{1 + C(s)P(s)} \quad (16)$$

Función de sensibilidad

$$T(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)}$$

Función de sensibilidad complementaria (17)

Donde la suma de $S(s) + T(s) = 1$, $S(s)$ es una función monótonica y decrece en el rango de la frecuencia para un buen ajuste de baja frecuencia, y $T(s)$ es monótonica, incrementando la incertidumbre con el aumento de la frecuencia; el peso de cada función se establece por medio de una rutina que permite determinar la sensibilidad.

La comparación de los resultados entre Kharitonov y H_∞ se realiza a nivel de simulación y experimentalmente se encuentra que el controlador tiene una respuesta rápida para converger, mostrando unas pequeñas oscilaciones en el sobrepaso, mientras que el modelo de Kharitonov muestra una convergencia lenta y sobrepaso largo [13][59].

Esta técnica de control parte de la siguiente ecuación de estado.

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) \quad (18)$$

Y se define la superficie deslizante como:

$$\sigma(X) = SX \tag{19}$$

Donde $S \in R^{m \times n}$ y la función de Lyapunov se toma como:

$$V(X) = \frac{1}{2} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_m^2) \tag{19}$$

$$\dot{V}(x) = \sigma_1 \dot{\sigma}_1 + \sigma_2 \dot{\sigma}_2 + \dots + \sigma_m \dot{\sigma}_m \tag{20}$$

La ley de control:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} -\beta_1 \sqrt{\sigma_1} \operatorname{sgn}(\sigma_1) \\ \vdots \\ \beta_m \sqrt{\sigma_m} \operatorname{sgn}(\sigma_m) \end{bmatrix} \tag{21}$$

El resultado de la simulación con ruido blanco muestra que el controlador en modo deslizante tiene mejor desempeño que el controlador PD al comparar los resultados, en un modelo linealizado; también es válido para modelos no lineales, con incertidumbre en el modelo dinámico [38].

Otro modelo de control está basado en la lógica difusa y controla la velocidad, el cabeceo, ángulo de cabeceo y la altura, con dinámica desacoplada de vuelo longitudinal y lateral. Como entradas se tienen el error E y el cambio del error EC , con un integrador para compensar el error de la referencia causada por las perturbaciones; actúa como una puesta a cero al cambio de la referencia y ocurre cuando se tienen pequeños cambios del error; se busca tener el mejor modelo y se recurre a la optimización por medio de algoritmos genéticos, y los resultados son llevados a un modelo real; en las pruebas de simulación los resultados obtenidos son basados en un modelo no lineal en 3D y son factibles los resultados del modelo del controlador.

Como proyecto futuro se plantea el desarrollo de un dirigible con un alto grado de autonomía por medio de visión para identificación de objetivos y seguimiento de trayectorias [51].

Se fundamenta en la aplicación de redes neuronales como solución a la problemática en el sistema de control, hace uso de información para el control con entrada visual e información inercial con el objeto de

controlar la velocidad, no se tiene una trayectoria predefinida, las pruebas se realizan en un cuarto cerrado; como resultado se tienen desventajas por usar evoluciones artificiales para descubrir un eficiente controlador del robot debido al tiempo empleado para evaluar toda la población del controlador sobre el número de generaciones, al igual que tener buenos resultados de simulación; en las pruebas del controlador reales, al ser comparadas con la simulación, se obtiene una comparación y se muestran unos resultados de correlación entre la simulación y los datos reales aceptables para un navegador específico con una altura constante automática. Finalmente, se busca realizar aplicaciones de microvuelo con dirigibles.

Otros modelos de neurocontroladores han aprovechado el aprendizaje, reforzado por medio de algoritmos de procesamiento haciendo uso del método gaussiano y aplicación del método de Monte Carlo para ser aplicado en un espacio continuo - espacio de acción. En este caso no se hace necesario conocer un modelo dinámico predefinido y es habilitado para el aprendizaje de una política en línea; como resultado de esto se han hecho pruebas reales y se ha comparado con las simulaciones, mostrando que el aprendizaje es rápido y efectivo [35] [56][70].

El control de robots basado en visión se puede tener en dos niveles, principalmente: uno de decisión, donde la información visual es utilizada para planear tareas, y otro de control, para dirigir un segundo robot con una estrategia definida.

En esta revisión el objetivo es el estudio del control servovisual, para el cual se tiene una cámara embarcada para el desarrollo del estudio de parámetros y algoritmos y estrategias de control de sistemas.

Las estrategias de control servovisual se pueden clasificar en función del error:

- Control servovisual basado en la posición 3D, donde la señal de error está definida en coordenadas cartesianas 3D, con el objeto de desarrollar movimientos adecuados del sistema de la cámara con una posición inicial igual a cero; éste se aproxima progresivamente a la posición deseada o final. Las dificultades de este modelo están en la estimación de la posición del robot para cada instante. Ante este problema se hace necesario la reconstrucción 3D del objeto, y como consecuencia el conocimiento del modelo

del objeto, la calibración de la cámara y el alto costo computacional se traducen en dificultades para la implementación en tiempo real.

- Control servovisual basado en la imagen 2D, donde la señal de error está definida directamente en cuanto a la información extraída del plano de la imagen. El objetivo es controlar el movimiento de la cámara para que las medidas realizadas en la imagen permitan obtener un valor deseado. Las dificultades de este método son superadas por medio de la implementación de un control en tiempo real embarcado, al tiempo que los movimientos de la cámara se relacionan con los movimientos por medio de una matriz de interacción.
- Métodos híbridos basados en utilizar métodos 2D para algunos grados de libertad, u otras estrategias para otros grados de libertad.

Estos modelos son las estrategias de control servovisual aplicadas en la imagen. Los resultados obtenidos son el desarrollo de un modelo de control servovisual en un ambiente servovisual simulado en seguimiento de trayectorias como ríos, ductos, carreteras, con el análisis de convergencia del error durante el seguimiento visual con diferentes matrices de interacción. Y estimación óptima de las características útiles de la imagen durante la navegación para el tratamiento del ruido y minimización de los efectos por las perturbaciones atmosféricas [19][26].

Las técnicas básicas del procesamiento de imágenes son la herramienta para el desarrollo del control y están definidas en dos grupos que han estudiado diversos autores. La primera es el *flujo óptico*, donde se obtiene un campo de velocidades en el plano de la imagen y el *método de seguimiento de regiones* las cuales están definidas por un tamaño de regiones de 7x7, donde se trata de obtener los desplazamientos que experimentan un número de regiones a lo largo de la secuencia de imágenes [14].

El flujo óptico trata de obtener un campo denso de velocidades en el plano de la imagen y permite la detección de objetos en movimiento en una imagen, llevando a la geolocalización por medio de escenas planas. El flujo óptico permite hacer un control de navegación para el desarrollo de vuelos con obstáculos en lugares cerrados, ayudados con sensores de ultrasonido e infrarrojos.

Como ventajas del análisis por medio del flujo óptico se tienen la adición de información a las condiciones iniciales y la transformación de los parámetros residuales, mantenidos con valores pequeños; se mantiene un promedio en el ajuste de los parámetros cuando se trabaja con marcas en la imagen, las cuales se pueden usar para medición visual de odometría y estimación, permitiendo eliminar el error ocurrido en la imagen; esto se realiza con un modelo desacoplado considerando una altura constante, y como resultado se permite una precisión del ajuste de la trayectoria. Se determinaron dificultades en la reconstrucción de la imagen 3D al ser comparadas con otras imágenes, y se encontró que la ley de control se fundamenta en una ley basada en la cinemática del error. Como trabajo futuro se propone incluir la dinámica en el sistema de ajuste y en el diseño del controlador [14][24][15].

Se puede hacer uso de un filtro Kalman para mejorar la predicción, permitiendo ajustar y afinar el modelo calculado; este desarrollo se puede modelar por medio de ocho parámetros:

$$u' = \frac{q_{1u} + q_2 v + q_2}{q_7 u + q_2 v + 1} \quad v' = \frac{q_4 u + q_5 v + q_6}{q_7 u + q_2 v + 1} \quad (18)$$

Donde $(u', v') = w(u, v)$ transformación en la imagen, la cual es paramétrica [22].

El método de seguimiento de regiones permite definir una serie de puntos en la imagen, los cuales son seguidos en el plano de la imagen durante la secuencia, calculando en cada caso la homografía por medio de métodos de mínimos cuadrados, creando regiones en el plano de la imagen. El cálculo de la homografía se realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} u\lambda, ref \\ u\lambda, ref \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{pmatrix} u_{ref} \\ v_{ref} \end{pmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{pmatrix} u\lambda, ref \\ v\lambda, ref \end{pmatrix} \quad (23)$$

Donde $x_i = (u_i, v_i)^T$ es la posición del pixel en la imagen i , mientras que $x_{ref} = (u_{ref}, v_{ref})^T$ es la posición del pixel correspondiente en la imagen de referencia; para el cálculo de la homografía sólo basta conocer la

correspondencia de cuatro puntos de los ocho, y para mejorar el resultado se hace uso de la transformación de mínimos cuadrados.

Lo que se sigue en la imagen son regiones en torno a cada punto, las cuales se buscan en la nueva imagen I_i usando el método de la suma de las diferencias al cuadrado, para hallar la posición que minimiza $\delta(x,y)$.

$$\delta(x, y) = \sum_{\mathbf{R}} (R(k, l) - I_i(x + k, y + l))^2 \quad (24)$$

Donde δ es el valor mínimo encontrado en un entorno del mínimo inicial. Como mecanismo de selección de las regiones para el seguimiento se hace necesario encontrar un alto contraste en las regiones de estudio.

Como mecanismo de medición basada en el criterio de mínimos cuadrados, donde los autovalores de la matriz son altos y adecuados; otro modelo es el empleo de la función gaussiana.

Como trabajo futuro se propone utilizar técnicas de estimación más robustas para la estabilización y la localización como *Last median squares* (LMedS) o M-estimadores, mejoran el cálculo ante datos con errores debidos al seguimiento [14][41].

Este análisis se basa en definir una señal en el plano de la imagen que permita ser identificada por medio de puntos que permiten formar un tetraedro, el cual por geometría óptica permite obtener propiedades que son determinadas en píxeles y que corresponden a los puntos de la señal de referencia, como se puede observar.

Tomando C la cámara con el punto focal F y tomando M como la señal de referencia con cuatro puntos no coplanares $\{P_0, P_1, P_2, P_3\}$ y $\{p_0, p_1, p_2, p_3\}$, los puntos coplanares correspondientes a la proyección de la imagen de las características de los puntos de M sobre la proyección de la imagen de C , donde el vector v_i determina la posición y orientación de C puede ser determinada. Donde las distancias entre los puntos P_i son conocidas y los vectores v_i son determinadas si la posición de los puntos P_i es conocida.

Como resultado de los experimentos se obtienen buenos resultados en cuanto a precisión y tiempo, presentando un sistema viable para ser empleado en la navegación de un dirigible autónomo; como desarrollo futuro se propone la implementación de la cámara al dirigible en condiciones de lazo cerrado, en trayectorias

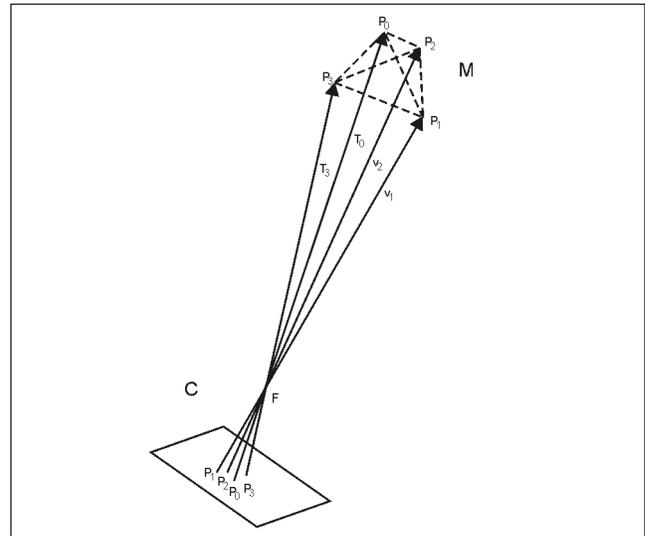


Figura 4. Proyección de la imagen de los vértices del tetraedro M sobre el plano de la imagen de la cámara C .

predefinidas basadas en el cálculo del sistema de visión [42][43][62].

El método consiste en ajustar un flujo de puntos en la imagen. Este método, desarrollado por Lucas-Kanade, es una extensión, ya que el funcionamiento del método original no es eficiente para la rotación y escalado de la imagen, la modificación consiste en dos pasos: el primero es desarrollar la traslación y el segundo es la rotación y escalado. Hay que ajustar la posición alrededor de un objetivo, teniendo como entrada la velocidad del dirigible, el controlador desarrollado para este problema es proporcional; como resultado se obtiene un experimento aceptable, pero sin tener en consideración las perturbaciones del viento; como proceso para desarrollarse propone implementar un algoritmo EKF para tratar situaciones donde las características de los puntos están fuera de vista; en general, el algoritmo da los resultados esperados [40][63].

En el control servovisual se han desarrollado modelos con el objeto de implementar un controlador óptimo; se establecen aspectos relacionados con la visión y la cámara se ubica en la góndola en la parte inferior, la posición de orientación de la cámara está definida como \bar{F} de $R^3 \times SO_3$ con seis dimensiones; las señales dadas por la imagen se pueden considerar como un conjunto de características geométricas para ser empleadas en la construcción de una proyección 3D de objetos perte-

recientes a la escena sobre la imagen; la relación entre las velocidades de la imagen y la velocidad de la cámara es expresada por la matriz de interacción L^T .

$$\dot{s} = L^T \begin{bmatrix} V_{cam} \\ \Omega_{cam} \end{bmatrix} \tag{25}$$

Donde V_{cam} y Ω_{cam} son la velocidad lineal y velocidad angular de la cámara; la L^T puede ser obtenida para muchos tipos de sensores y define el difeomorfismo entre la configuración del espacio del vehículo y el plano de la imagen. El objeto del sistema de visión es extraer y calcular los parámetros característicos de la imagen s en cada cuadro durante el movimiento del robot y enviar éstos al sistema de control.

El controlador optimal está desarrollado con base en la dinámica completa del dirigible, y el sistema está aumentado por incluir el vector de visión y se deriva en un sistema LTI; el esquema de control para el manejo de la imagen para el ajuste se diseña con un PD de error retroalimentado; el diseño del controlador LQR es sencillo de usar y es robusto, garantizando ciertas propiedades, como en [17]. Se selecciona una función cuadrática de costo que se minimiza como:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty [x^T Q x + u^T R u] dt \tag{26}$$

Donde Q es la matriz de pesos, definida semipositiva y R , definida positiva, es seleccionada de acuerdo con las características del sistema o del objetivo de control global; como resultado, se obtiene una ley de control dada por:

$$u(k) = -K C^+ y(k) \tag{27}$$

El superíndice + denota la pseudoinversa de la matriz. Como resultado final, el controlador diseñado para el dirigible muestra buenas características, despreciando el ruido medido y las deficiencias de actuación [23][24].

Otro desarrollo en donde se hace uso de la detección de puntos y se recurre a la implementación del diseño inverso óptimo es un problema de estabilización de control en lazo cerrado dado:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \tag{28}$$

Con las siguientes propiedades:

1. $u(x)$ alcanza una estabilidad asintótica de equilibrio $\dot{x} = 0$.
2. $u(x)$ minimiza el costo funcional.

$$J = \int_0^\infty (l(x) + u^T R(x) u) dt \tag{29}$$

Donde $l(x)$ es semidefinida positiva y $R(x)$ es matriz definida positiva para todo x .

Pero se debe resolver la ecuación Hamilton-Jacobi-Belman:

$$\begin{aligned} l(x) &= L_f V(x) - \frac{1}{4} L_g V(x) R^{-1}(x) (L_g V(x))^T = 0 \\ V(0) &= 0 \end{aligned} \tag{28}$$

Donde $V(x)$ es una función escalar semidefinida positiva y $L_f V(x)$ es la derivada de Lie y definida como $\frac{\partial f}{\partial x} V(x)$. $V(x)$ es la función de Lyapunov para el sistema, si para todo $x \neq 0$.

$$L_g V(x) = 0 \Rightarrow L_f V(x) < 0 \tag{30}$$

La ley de control está dada por la fórmula de Sontag:

$$u(x) = \begin{cases} - \left(C_0 + \frac{\alpha(x) + \sqrt{\alpha^2(x) + (\delta^T(x) \delta(x))^2}}{\delta(x)}, \delta(x) \neq 0 \right) \\ 0 & \delta(x) = 0 \end{cases} \tag{31}$$

Como conclusión del trabajo se confirma la eficacia del controlador con ajuste óptimo inverso para un modelo cinemático [17][61][64].

El uso de un controlador difuso basado en la identificación de puntos es otro modelo de implementar un control de dirección de un dirigible que se basa en el desarrollo de una metodología geométrica, haciendo uso de puntos para el cálculo de la posición y orientación utilizando una cámara instalada en la base de la góndola, donde el plano B es paralelo al plano de la imagen y permite determinar fácilmente la guiñada, se basa en un controlador con reglas difusas y un integrador. El integrador se usa para integrar el error como una tercera

entrada y compensar el error debido a la referencia por desbalance de fuerzas y otras perturbaciones, éste coloca a cero en cada cambio de referencia y ocurre solamente para pequeños cambios de error.

El controlador difuso controla el cabeceo, las entradas son el error de cabeceo y el cambio de error del cabeceo y las salidas son δ_p , K_p , K_v , normalizadas para un universo de discurso en un rango de $[-1,1]$ y la salida es la deflexión en un rango de $[-30^\circ, 30^\circ]$ de las superficies de control.

Como resultado se tiene un desempeño fiable y el sistema puede ajustar la trayectoria de la misión con precisión [47].

En la navegación de un *blimp* que se desplace en áreas urbanas en la búsqueda y rescate, es necesario memorizar distintos lugares y relacionarlos entre estos lugares en una grafica estructurada, un mapa topológico, el agente está habilitado para navegar desde un lugar conocido a otro por medio de recordar lugares. Por tanto, es necesario hacer la localización en cada lugar conocido.

La selección de una buena marca reside en suponer que es detectable, única y confiable, y está relacionada con los métodos de reconocimiento o una imagen reparada, donde discrimina partes de la imagen usadas para caracterizar el objeto o la imagen, respectivamente; todos los métodos de selección de marcas reducen la incertidumbre. Algunos usan el parecido y la probabilidad para reducir la incertidumbre de la localización. Otros prueban el uso de marcas en lugares donde es conocido el escollo y se localiza un pequeño error.

Como modelo se propone en dos pasos: en el primero se preselecciona un conjunto de puntos en la imagen o marcas, y en el segundo se prueba la confiabilidad de los puntos únicos o marcas preseleccionados y se rechaza los que no satisfacen el criterio, seguido del reconocimiento, usando subimágenes alrededor de los puntos seleccionados.

Se utilizan algoritmos basados en Análisis de Componentes Principales (PCA), técnicas que permiten seleccionar marcas únicas y evaluar su confiabilidad.

Este algoritmo toma un conjunto de imágenes g_i ; $i = 1 \dots n$ en el cálculo del *eigenspace* y el número de marcas l seleccionadas como entrada; en el siguiente paso se calcula la matriz de distancia D . Con el conocimiento de las dos imágenes como entrada, la distancia es:

$$D_{ij} = \text{dist}(g_p, g_j) \quad (32)$$

Como la distancia es una función, se usa la suma del cuadrado de la diferencia (SSD) normalizada por la varianza del vector, a una distancia del vector p con:

$$p_j = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1, i \neq j}^n D_{i,j} \quad (33)$$

Calculando el promedio sobre la columna j de la matriz de distancia. Donde D_{ij} está cerrada a la unidad si la subimagen es muy disímil, o a una buena marca en la subimagen. La selección se hace por variación de p en forma ascendente y seleccionando las marcas correspondientes a grandes valores de l .

Como segundo algoritmo de comparación se tiene IPCA, basado en la densidad de la imagen basada en las desventajas del PCA; este algoritmo requiere un conjunto de imágenes S , el número de marcas l y el conjunto de subimágenes marcadas $X^? = X/S$.

Cada imagen $x_i \in X^?$ es transformada al *eigenspace* y el resultado del vector residuo r_i es calculado. Donde la norma del vector residuo es medido como buena al considerar la imagen, la máxima norma de todo el vector residuo es calculada y en la imagen correspondiente es seleccionada una nueva marca; el algoritmo termina si el número de marcas seleccionado es más grande que l .

Como resultado de los dos modelos, el primero evalúa las diferencias entre las posibles marcas y el segundo aumenta el *eigenspace*; los resultados en ambos algoritmos son buenos [25].

Una estrategia empleada para el desarrollo del control con entrada visual es el uso de reguladores como el LQR y adicionar un filtro Kalman como observador; el modelamiento se desarrolla con la adición de términos no lineales en el control de orientación, que mejora el desempeño en la respuesta del sistema. Este desarrollo se fundamenta en un controlador PID, el algoritmo de visión, y se asume que la imagen es casi plana; esta metodología está basada en la linealización del modelo desacoplado del cabeceo y XZ subsistemas, el regulador LQR y el filtro Kalman en la condición que tiene buena estabilidad, rechazo a las perturbaciones e inmunidad al ruido.

Para el regulador LQR, las variables de estado son directamente medibles con las rutinas de procesamiento de la imagen; este tipo de controlador

calcula la ganancia del vector K que genera la ley de control $u(k)$ por:

$$u(k) = -Kx(k) \quad (34)$$

Donde $x(k)$ es estado discreto del sistema el vector de ganancia K , obtenido por la minimización de la función cuadrática de costo:

$$j = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [x^T(k) Q_1 x(k) + u^T(k) Q_2 u(k)] \quad (35)$$

Q_1 y Q_2 son las matrices de peso, las cuales son botones de ajuste que permiten el ajuste con la ayuda del simulador y de trabajos experimentales.

El observador de Kalman tiene por objeto mejorar la inmunidad al ruido y robustecer el sistema; éste se usa en los dos casos para estimar ausencia de las variables necesarias para la ley de control del controlador LQR o como filtro y sensor de ruido. Los resultados de la experimentación son buenos con la adición de los parámetros no lineales, permitiendo una buena respuesta y seguimiento en trayectoria como estación móvil; como futuro desarrollo se tiene caracterizar el ruido introducido por el algoritmo de visión y el mejoramiento de alinear el centro de flotación con el centro de impulso [21].

Se han desarrollado otros modelos en los que la cámara no está sujeta al dirigible sino que está en tierra fija o móvil, donde se trabaja la retroalimentación por visión, el cual se desarrolla con una dinámica no lineal y un movimiento plano; se aplica la linealización de retroalimentación para el desarrollo de un controlador PD, donde el objetivo del control es ajustar la trayectoria; la segunda consideración es un sistema de lazo cerrado con estabilidad asintótica, en donde se tiene una dinámica no lineal.

Se desarrollan un controlador PD y la linealización sobre:

$$\begin{aligned} X &= g(X)U \\ U &= g(X)^{-1} (-K_p(X - X_d) - K_d(\dot{X} - \dot{X}_d) + \dot{X}_d) \end{aligned} \quad (36)$$

Donde X_d es la referencia de la trayectoria y K_p es la ganancia de retroalimentación PD.

Los resultados de los experimentos demuestran gran eficacia en el diseño de un controlador PD linealizado,

con una dinámica no lineal y una estabilidad asintótica en lazo cerrado [60].

Otro desarrollo similar es el uso de un dirigible para proyectar una imagen sobre la superficie (carena) por medio de un proyector, del modelo dinámico y del controlador PD.

Se puede diseñar el controlador PD por medios experimentales, donde $e_d(t)$ es el error del ángulo de guiñada, $e_a(t)$ error de la distancia entre la pared y el dirigible y $e(t)$ es el error de la posición entre la determinada trayectoria y la dirección longitudinal del dirigible. La matriz K es la ganancia del controlador PD. $T_r(t)$ es empuje del motor M1 en modo lateral, $T_l(t)$ empuje del motor M2 en modo lateral, $T_f(t)$ empuje del motor M3 en modo de altitud, $T_r(t)$ empuje del motor M5, M6 en modo longitudinal.

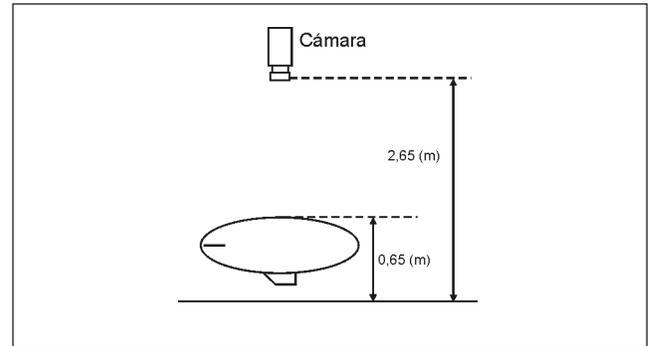


Figura 5. Posición de la cámara y dirigible.

$$T = K.E$$

$$T = [T_p, T_p, T_p, T_p, T]^T$$

$$E = [e_d, e_d, e_a, \hat{e}_d, \hat{e}_d, \hat{e}_a, \hat{e}, \hat{e}]^T \quad (37)$$

Ecuación de control, basada en el error de cada uno de los grados de libertad; este diseño permite el seguimiento del dirigible por el proyector de imágenes y mantiene la proyección sobre la superficie del dirigible. El modelo tiene limitaciones debido a que puede volar a lo largo de la pared y no arbitrariamente en un espacio porque tiene sensores de ultrasonido que miden la variación de la posición; la segunda conclusión es que el controlador no puede mantener la posición estable si existen perturbaciones grandes, y como tercer elemento el video no es continuo debido a que toma mucho

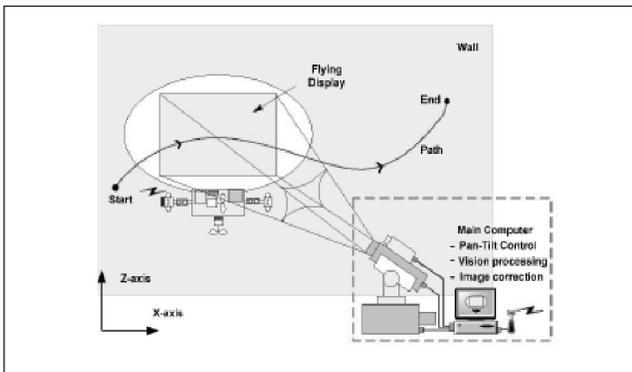


Figura 6. Montaje del dirigible y proyector de imágenes.

tiempo compensar la distorsión causada por la superficie oval del dirigible. Como mejora futura se colocarán giróscopos que permitirán el vuelo a lo largo de una trayectoria arbitraria en un espacio, se planea estudiar un controlador robusto para mejorar el desempeño del dirigible a las perturbaciones y reducir el tiempo para compensar la proyección de la imagen [65].

A continuación se muestra el *hardware* necesario para implementar un control servovisual con una estación terrena (figura 8).

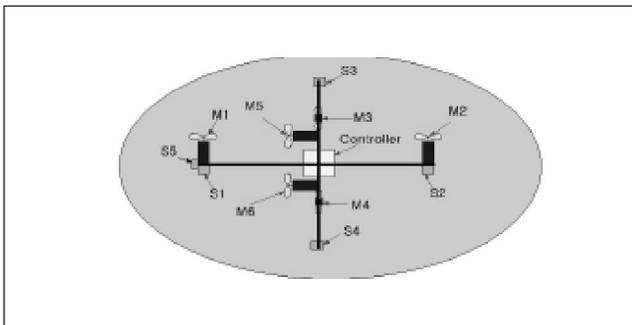


Figura 7. Distribución de los motores.

El modelo característico de implementación del *software* se muestra a renglón seguido (figura 9).

DISCUSIÓN

En general, el desarrollo de los modelos dinámicos se ha fundamentado en la aplicación de las leyes de Newton-Euler, motivado por la menor cantidad de operaciones matemáticas al desarrollar un programa para la solución del modelo y su facilidad de implementación. Los modelos basados en energía son más elaborados y

exigentes y tienen una mayor cantidad de operaciones, haciendo más complejo el cálculo, por lo que se requiere más capacidad computacional debido al cálculo de las derivadas o integrales que se deben resolver.

Se encuentra que también se tienen otros modelos dinámicos, los cuales han sido mezcla de varios entre Newton-Euler, Lagrange o Hamilton, donde se ha buscado hacer más sencillo el cálculo. Otros modelos, como los basados en Kane o de Giles, son escasos en la literatura y dejan espacio para el desarrollo de modelos dinámicos basados en estas teorías.

Se han encaminado en el desarrollo de modelos simples o reducidos en la parte dinámica, permitiendo disminuir la exigencia computacional; se tienen simplificaciones en linealización por tener modelos dinámicos no lineales, los cuales se simplifican por medio de linealizaciones en un punto de operación.

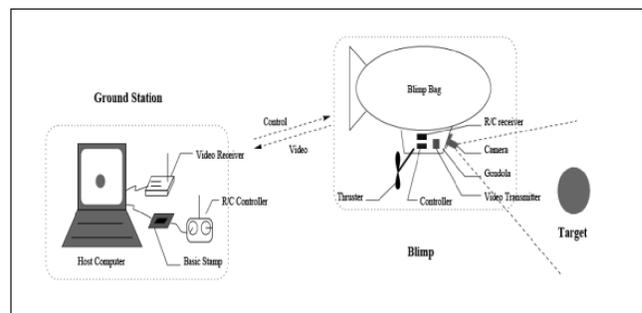


Figura 8. Esquema de montaje de visión.

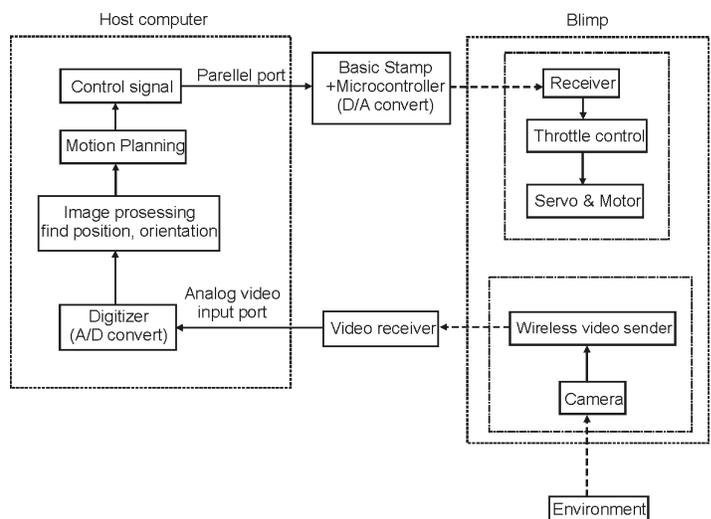


Figura 9. Diagrama del flujo de control por servovisión.

Las estrategias de control son diversas y están fundamentadas desde el control clásico hasta estrategias de algoritmos modernos, como neurocontroladores, algoritmos genéticos, lógica difusa, entre otros modelos; éstos han dado resultados dentro de los parámetros de la simulación y de algunos experimentos reales permitiendo la comprobación de los modelos como espacio para el desarrollo de nuevas propuestas. En el área de control esto es posible, ya que no hay documentación donde se muestre un desarrollo final en los diferentes centros de investigación o universidades, dando pie a proponer estudios en plataformas móviles haciendo uso de controladores basados en control moderno y con algoritmos de inteligencia artificial.

La identificación de parámetros se ha estudiado desde diferentes enfoques que han permitido determinar, en los modelos experimentales, los coeficientes aerodinámicos y de los modelos de control.

El desarrollo de la servovisión es un área de interés porque permite la identificación de objetivos dentro de la imagen para el desarrollo de aplicaciones en diferentes campos de estudio, también sirve para el desarrollo de modelos de control por medio de la visión en 2D o 3D, siendo un campo explorado pero que no ha tenido un desarrollo total; este campo tiene espacios de trabajo en ambientes controlados y de condiciones ambientales reales, donde en las últimas no se han tenido grandes éxitos debido a que las condiciones de iluminación son variables; por eso es necesario el desarrollo de estudios encaminados a construir algoritmos robustos o que se adapten a las condiciones de operación. De aquí se desprende un área amplia de trabajo en la visión en ambientes externos y no controlados, con aplicaciones en diversas áreas de investigación.

En la parte de visión el uso de una cámara para visión monocular, sea en tonos de gris o en color, y algoritmos de visión por medio de seguimiento de regiones son una opción adecuada, ya que permiten el desarrollo de identificación de objetos; otra alternativa, cuando la aplicación está orientada al seguimiento e identificación de objetos móviles en la imagen, se puede basar en el flujo óptico, que de acuerdo con la revisión se analiza poco; las dificultades se presentan en las deformaciones que se tienen debido al modelamiento y aberraciones de la cámara, las cuales se deben estudiar ya que forman parte del modelo.

El desarrollo de algoritmos que permitan el control del AUV por medio de visión es un campo de muchas aplicaciones, las cuales se pueden orientar a trabajos de índole civil en desastres, satélites de baja altitud, exploración y vigilancia, entre otras. Los desarrollos de *hardware* y *software* permiten el mejoramiento continuo de estrategias de identificación, control y servovisión que mejoran en la calidad de los procesos, y acercarse más a vuelos completamente autónomos, al desarrollo del control en tiempo real del vuelo, y a robots móviles con capacidad de decisión y que realicen tareas definidas.

REFERENCIAS

- [1] Azinheira, J. de Paiva, E.C. & Bueno, S. (2002). Influence of Wind Speed on Airship Dynamics" *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 25, No. 6, November-December.
- [2] Yamasaki, T. & Goto, N. (2003). Identification Of Blimp Dynamics Via Flight Test, *Trans. Japan Soc. Space Sci*, vol. 46, No. 153, pp. 195-205.
- [3] Patino, D., Solaque, S., Lacroix, S. & Gauthier, A. (2005). Estimation of Aerodynamical Parameters of an Experimental Airship. IEEE Iros 2005 Workshop On Robot Vision For Space Applications.
- [4] Mueller, J. & Paluszek, M. (2004). Development of an Aerodynamic Model and Control Law Design for a High Altitude Airship. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [5] Zi-Li, C., Wei-dong, Q. & Yu-geng, X. (2005, agosto). Dynamic Modeling for Airship Equipped with Ballonets and Ballast. *Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 26 No. 8.
- [6] Hima, S. & Bestaoui, Y. (2003). Time-Optimal Paths for lateral Navigation of an Autonomous Underactuated Airship. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [7] Rooz, N. & Johnson, E. (2005). Design and Modeling of an Airship Station Holding Controller for Low Cost Satellite Operations. San Francisco: IAAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 15-18 August 2005.
- [8] Bastaoui, Y. & Hamel, T. (2003). Dynamics Modeling of Small Autonomous Blimps. Francia: Laboratoire des Systèmes Complexes, Cemif, Université d'Evry Val d'Essonne.
- [9] Bastaoui, Y., Hima, S. & Sentouh, C. (2002). Motion Planning of a Fully Actuated Unmanned Aerial Vehicle. Francia: Laboratoire des Systèmes Complexes, Cemif, Université d'Evry Val d'Essonne.
- [10] Zhao, Y. & Garrat, W. (2004). Benefits of Trajectory in Airship Flights. Chicago: AIAA 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference, Workshop and Exhibit 3 September.
- [11] Xiao-Liang, W. & Xue-xiong, S. (2006). Airship Attitude Tracking System, *Applied Mathematics and Mechanics*, 27(7): 919-926.
- [12] Bestaoui, Y. & Hima, S. (2003). Trajectory Tracking of a Dirigible in a High Constant Altitude Flight. Francia: Laboratoire des Systèmes Complexes, Cemif, Université d'Evry Val d'Essonne.

- [13] Hwan-Mo, Y., Kawashima, M. & Goto, N. (2003). Implementation of Robust Stability Augmentation Systems for a Blimp, *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci*, vol. 46, No. 153, pp. 155-162.
- [14] Merino, L. & Ollero, A. (2004). Procesamiento de Imágenes Aéreas para Detección y Monitorización Empleando Vehículos Aéreos. Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.
- [15] Green, W., Oh, P., Sevcik, K. & Barrows, G. (2003). Autonomous Landing for Indoor Flying Robots Using Optic Flow, *Proceedings of IMEC'03*, Washington: 2003 Asme International Mechanical Engineering Congress, November 15-21.
- [16] Oh, P. (2005). Flying Insect Inspired Vision for Micro-Air-Vehicle Navigation. Anaheim: Autonomous Unmanned Vehicles System International Symposium, Aug 3-5.
- [17] Zhang, H. & Ostrowski, J. (2003). Optimal Motion Planning in the Image Plane for Mobile Robots. General Robotics and Active Sensory Perception (Grasp), Laboratory University of Pennsylvania.
- [18] Silveira, G., Malis, E. & Rives, P. (2006). Visual Servoing Over Unknown, Unstructured Large-Scale Scenes, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- [19] Zhang, H. & Ostrowski, J. (2003). Visual Servoing with Dynamics: Control of an Unmanned Blimp. General Robotics and Active Sensory Perception (Grasp), Laboratory University of Pennsylvania.
- [20] Silveira, G., Azinheria, J., Rives, P. & Bueno, S. (2003). Line Following Visual Servoing for Aerial Robots Combined with Complementary Sensor, *Proceedings of Icar 2003*. Coimbra, Portugal: The 11th International Conference on Advanced Robotics, June 30 - July 3, 2.
- [21] Neves, M., Marques, J. & Bernardino, A. (2005). Performance Improvements on Vision Based Control and Navigation of an Indoor Blimp. Esprit-LTR Project 30185, Narval - Navigation of Autonomous Robots Via Environmental Perception.
- [22] Zwaan, S., Perrone, M., Bernardino, A. & Santos-Victor, J. (2005). Control of an Aerial Blimp Base don Visual Input. Esprit-LTR Project 30185, Narval - Navigation of Autonomous Robots Via Environmental Perception.
- [23] Silveira, G., Reginaldo, J., Carvalho, H., Rives, P., Azinheria, J., Bueno, S. & Madrid, M. (2002). Optimal Visual Servoed Guidance of Outdoor, *Proceedings of the American Control Conference Anchorage*, AK May 8-10.
- [24] Zwaan, S., Bernardino, A. & Santos-Victor, J. (2002). Visual Station Keeping for Floating Robots in Unstructured Environments, *Robotics and Autonomous Systems*, 39, 145-155.
- [25] Gerstmayr, L., Bernardino, A. & Santos-Victor, J. (2004). Appearance Based Landmark Selection and Reability Evaluation for Topological Navigation, 5th IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles. Lisboa: Instituto Superior Técnico, July 5-7.
- [26] Silveira, G., Carvalho, J. & Madrid, M. (2004). Controle Servo Visual de Veiculos Robóticos Aéreos, FEEC/Unicamp. Universidad Estadual de Campinas.
- [27] Solaque G., L.E. (2007). Modelado, control y navegación para vuelo autónomo de dirigibles. Universidad de los Andes.
- [28] Fossard, A.J. & Normand-Cyrot, T.D. (1993). Systemes non Linearies. Copyright Instrument Society of America North Carolina, V. 3.
- [29] Hygounenc, E. (2003). Modelisation et Commande d'un Dirigible pour le vol Autonome, *Rapport Laas*, No. 03502.
- [30] Azous, N., Bestaoui, Y. & Lemaître, O. (2002). Dynamic Analysis of Airships with Small Deformation, Third International Workshop on Robot Motion and Control, November 9-11.
- [31] Gomes, S.B.V. & Ramos, J.G., Jr. (1998). Airship dynamic modeling for autonomous operation, *Robotics and Automation, Proceedings*. IEEE International Conference on vol. 4, Issue, 16-20 May, 3462-3467.
- [32] Quadrelli, M., Chang, J. & Kowalchuck, S. (2004). Dynamics and Control of a Herd of Sondas Guide by a Blimp on Titan, 14th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Conference.
- [33] Hima, S. & Bestaoui, Y. (2003). Nonholomic motion generation on trim aerostatics trayectories for an autonomous underactuated airship. Laboratoire des Systems Complexes, CNRS-FRE Université d'évry val d'Essonne.
- [34] Dorrington, G. (2005, septiembre). Development of an airship for tropical rain forest canopy exploration, *The Aeronautical Journal*.
- [35] Zufferey, J., Guanella, A., Beyeler, A. & Floreano, D. (2006, agosto). Flying over the reality gap: from simulated to real indoor airship. Laboratory of Intelligent Systems Ecole Polytechnique Federale de Laussane.
- [36] Azinheria, J., Rives, P., Carvalho, J. & others (2002, mayo). Visual Servo Control for the Hovering of an Outdoor Robotic Airship, *Proceedings of the 2002 IEEE*. Washington: International Conference on Robotics & automation.
- [37] Mokhtari, A., Benellege, A. & Orlov, Y. (2006). Exact linearization and sliding mode observer for a quadrotor unmanned aerial vehicle, *International Journal of Robotics and Automation*, vol. 21, No. 2.
- [38] Beji, L., Abichou, A. & Bestaoui, Y. (2002, noviembre). Stabilization of a Nonlinear Underactuated Autonomous Airship-A Combined Averaging and Backstepping Approach. Third International on Robot Motion and Control.
- [39] Silveira, G., Malis, E. & Rives, P. (2006, mayo). Visual Servoing over Unknown, Unstructured large-Scale Scenes. *Proceedings of the 2006 International Conference on Robotics and Automation*. Orlando, Florida.
- [40] Fukao, T., Fujitani, K. & Kanade, T. (2003). Image-Based Tracking Control of a Blimp, *Proceeding of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, Maui USA.
- [41] Zaan, S., Bernardino, A. & Santos-Victor, J. (2000). Vision based station keeping and docking for an aerial blimp, *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- [42] Montenegro, M. & Souza, L. (1999). Autonomous Dirigible Navigation Using Visual Tracking and Pose Estimation, *Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Detroit, Michigan.
- [43] Souza, L., Montenegro, M. & Kumar, V. (1998). Computer Vision-Based Navigation for Autonomous Blimp. Anais do XI Sibgrapi.
- [44] Righetti, X., Cardin, S., Thalmann, D. & Vexo, F. (2007). Immersive Flight for Surveillance Applications. IEEE Symposium on 3D User Interface 2007. Charlotte, North Carolina, USA.
- [45] Xia, G. & Yang, B. (2005). The Robust Control for Unmanned Blimps Using Sliding Mode Control Techniques. Springer - Verlag Berlin Heidelberg.
- [46] Lemaire, T., Berger, C., Kyun Jung, I. & Lacroix, S. (2007).

- Vision -based SLAM: stereo and monocular approaches, *International Journal of Computer Vision*, Springer science.
- [47] Shao-Rong, X., Jun, L., Jin-Jun, R. & Zhen-Bang, G. (2007). Computer Vision-Based Navigation and predefined track following control of a small robotic airship, *Act Automatic Sinica*, vol. 33, No. 3.
- [48] Bestaoui, Y. (2005). Characterization of nom trim trayectories of an autonomous underactuated airship in a low velocity flight, *Proceeding of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain.
- [49] Svein, S. & Thor, F. (1991). Lagrangian formulation of underwater vehicles's dynamics, *Proceeding of the 1991 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. IEEE Press, 1029-1034.
- [50] Liu, Y. & Hu, Yueming (2007). Stability and Control Analysis Based on Airship Dynamic Modeling, *Proceeding of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*. Jinan, China.
- [51] Rao, J., Gong, Z., Luo, J. & Xie, S. (2005). A Flight Control and Navigation System of a Small Size Unmanned Airship, *Proceeding of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation*. Niagara Falls, Canada.
- [52] Silveira, G., Reginaldo, J., Carvalho, H., Rives, P., Azinheira, J., Bueno, S. & Madrid, M. (2002). Optimal Visual Servoed Guidance of Outdoor Autonomous Robotic Airship, *Proceeding of the American Control Conference Anchorage*, AK.
- [53] Faria, B. & Castro, L. (2003). Parameter Identification of an Airship Model Using Evolution Strategies. Catholic University of Santos.
- [54] Repoulias, F. & Papadopoulos, E. (2007). Dynamically Feasible Trajectory and Open-Loop Control Design for Unmanned Airship. Atenas: Mediterranean Conference on Control and Automation.
- [55] Mokhtari, A., Benallegue, A. & Orlov, Y. (2006). Exact linearization and sliding mode observer for a quadrotor unmanned aerial vehicle, *International Journal of Robotics and Automation*, vol. 21, No. 1.
- [56] Ko, J., Klein, D., Fox, D. & Haehnel, D. (2007). Gaussian Processes and Reinforcement Learning for Identification and Control of an Autonomous Blimp. Seattle: Dept of Computer Science & Engineering, University of Washington.
- [57] Kang, S., Nam, M., Kim, B., Tsubouchi, T. & Yuta, S. (2003). A Novel Design and Control of Robotics Wheeled Blimp for Tele-guidance, *Proceedings 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Kobe.
- [58] Takaya, T., Kawamura, H., Minagawa, Y., Yamamoto, M. & Ohuchi, A. (2006). PID landing orbit motion controller for an indoor blimp robot, *Artif Life Robotics*.
- [59] Azinheria, J., Paiva, E., Ramos, J. & Bueno, S. (2000). Mission Path Following for an Autonomous unmanned Airship, *Proceeding of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. San Francisco, CA.
- [60] Kawai, Y., Kitagawa, S., Izoe, S. & Fujita, M. (2003). An Unmanned Planar Blimp on Visual Feedback Control: Experimental Results. Sice Annual Conference in Fukui.
- [61] Fukao, T., Kanzawa, T. & Osuku, K. (2007). Tracking Control of an Aerial Blimp Robot based on Image Information. 16th IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-Conference on Systems and Control. Singapur.
- [62] Mirisola, L., Dias, J. & Almeida, A. (2007). Trajectory Recovery and 3D Mapping from Rotation-Compensated Imagery for an Airship. *Proceeding of the 2207 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Diego, CA.
- [63] Fukao, T., Fujitani, K. & Kanade, T. (2003). An Autonomous Blimp for a Surveillance System, *Proceeding of the 2003 IEEE/RSJ Inti. Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada.
- [64] Fukao, T., Kanzawa, T. & Osuka, K. (2005). Inverse Optimal Tracking Control of an Aerial Blimp Robot. Fifth International Workshop on Robot Motion and Control.
- [65] Oh, S., Kang, S., Lee, K., Ahn, S. & Kim, E. (2006). Flying Display: Autonomous Blimp with Real-Time Visual Tracking and Image Projection. *Proceeding of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Beijing, China.
- [66] Driankov, D. & Saffiotti, A. Fuzzy Logic Techniques for Autonomous Vehicle Navigation. Springer-Verlag Company, ISSN 1434-9922.
- [67] Ollero, A., García, A. & Martínez, J. (1994). Fuzzy Supervisory path tracking of mobile Robots, *Control Eng*, vol. 2, Elsevier Science Ltd., pp. 313-319.
- [68] Kungl, P., Schlenker, M., Winmmer, D. & Kröpling, B. (2004). Instrumentation of remote controlled airship "Lotte" for in flight measurements. *Aerospace Science and Technology*.
- [69] Silveira, G., Malis, E. & Rives, P. (2006). Real Time Detection of planar Regions in a Pair of Images, *Proceeding of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent and Systems*. Beijing, China.
- [70] Rottman, A., Plagemann, C., Hilgers, P. & Burgard, W. (2007). Autonomous Blimp Control Using Model-Free Reinforcement Learning in a Continuous State and Action Space, *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Diego, CA.
- [71] Lutz, T., Funk, P., Jakobi, A. & Wagner, S. (2002). Summary of Aerodinamical Studies on the Lotte Airship. Institute for Aerodynamics and Gas Dynamics, University of Stuttgart. Presented at the 4th International Airship Convention and Exhibition, Cambridge, Inglaterra.
- [72] Lacroix, S. & Jung, K. (2002). High resolution terrain mapping with an autonomous blimp. *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems EPFL*. Lausanne, Suiza.
- [73] Fu, K., Gonzales, R. & Lee, C. (1996). *Robótica*, McGraw Hill.
- [73] Bloch, A., Leonard, N. & Marsen, J. (2000). Controlled Lagrangian and the stabilization of mechanical system - I the first matching theorem. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 45(12); 2253-2270.
- [74] Cai, Zili, Qu, Weidong, Xi, Yugeng & Wang, Yongjun (2007). Stabilization of an underactuated bottom-heavy airship via interconnection and damping assignment, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 17, Issue 18, pp. 1690-1715.