AUTOPILOTOS ADAPTIVOS DE BUQUES. UN ENFOQUE UNIFICADO

Juan Hernández Sánchez

Resumen

En el presente artículo es presentado y propuesto un enfoque y esquema unificado para el estudio, análisis y otros propósitos de los autopilotos adaptivos para buques.

Primero es incluido el tema de los autopilotos navales, su ámbito y algunos hitos de su evolución. Luego son presentados, en forma más concreta, conceptos sobre el control automático de rumbo.

Más adelante son analizados los autopilotos convencionales y la necesidad de métodos de control adaptivo. Esto es seguido por la proposición de un esquema unificado que engloba los diversos autopilotos adaptivos conocidos, incluyendo una reseña de las técnicas de control adaptivo empleadas. Se prosigue con una breve descripción de tres autopilotos adaptivos que han sido dados a conocer en la literatura especializada en control automático. Son expuestas escuetamente algunas técnicas basadas en disciplinas en pleno desarrollo, que pueden ser aplicables con ventaja en autopilotos más inteligentes, las que se enmarcan dentro de la estructura unificada propuesta en este artículo.

Introducción

El control automático del rumbo de buque fue iniciado en 1922 por N. Minorsky y E. Sperry, en forma independiente, y desde entonces ha evolucionado sostenidamente, con ciertas etapas bien discernibles, en respuesta a requerimientos más estrictos de operación, seguridad y economía de la navegación, utilizando los mejores métodos y tecnologías de la automática, en cada época. El problema consiste en mantener el rumbo real en coincidencia con el rumbo deseado o comandado. En la etapa inicial se hizo uso de los conceptos básicos de la automática, como el principio de retroalimentación, y de componentes eléctricos, mecánicos e hidráulicos entonces disponibles.

Más adelante, en forma concurrente con la evolución de la automática en otras áreas, empezaron a ser aplicados controladores automáticos, en particular el conocido controlador PID (proporcional-integrativo-derivativo), con componentes de los tipos antes mencionados. El controlador PID ha demostrado poseer, conceptual y prácticamente, excelentes características y continúa siendo la herramienta fundamental en la automática. Sin embargo, su realización o implementación ha evolucionado hacia el empleo de electrónica discreta o integrada, con interfases apropiadas para ser conectadas a los componentes eléctricos, neumáticos, mecánicos o hidráulicos del resto del sistema de gobierno del rumbo de la nave (timón, hélice y otros). Esos tipos de PID son conocidos como realizaciones en *hardware*.

El advenimiento y rápido desarrollo de los computadores, particularmente de los microcomputadores, permitió la realización de controladores PID en *software* o con programas computacionales. Tanto la electrónica como los microcomputadores permiten implementar, fácil y económicamente, acciones de control no sólo PID sino otras mucho más complicadas que sean menester. Asimismo, hay controladores realizados con combinaciones *hardware-software* (*firmware*), aunando ventajas de ambos tipos de realizaciones.

En el ámbito naval y otros, los controladores automáticos de rumbo fueron evolucionan-

do hacia los autopilotos o pilotos automáticos. Un autopiloto es, básicamente, un controlador PID con componentes adicionales, como un limitador de ángulo de timón, una zona muerta y un filtro para suavizar la señal entregada por el controlador. Este tipo será llamado aquí autopiloto convencional o PID.

El controlador PID tiene tres parámetros o coeficientes ajustables por el operador. Dichos parámetros son ajustados o sintonizados, por métodos aproximados y conocidos, a valores que aseguren un óptimo comportamiento del sistema (controlador-buque) en una situación (de navegación) determinada y con condiciones ambientales (olas, viento) dadas o existentes. El hecho que los parámetros PID sean mantenidos fijos en esos valores sintonizados tiene varios inconvenientes, algunos de los cuales son descritos más adelante.

En el ámbito general, los inconvenientes de los controladores con parámetros fijos se hicieron evidentes en la época de la Segunda Guerra Mundial, por lo que fueron concebidos controladores y métodos *ad hoc* de tipo adaptivo o adaptable, comúnmente llamados adaptivos. Estos son controles diseñados de modo tal que autoajustan sus parámetros en consonancia con los cambios que experimenta el sistema controlado. Los primeros controladores o reguladores adaptivos fueron aplicados en bombarderos de gran altura, submarinos, aviones de gran velocidad y otros.

Los autopilotos adaptivos de buques fueron introducidos en los años setenta. Hay una gran variedad de ellos, están diseñados *ad hoc* y emplean diversos métodos de control adaptivo.

Concepto de control automático de rumbo

Los fundamentos del control automático de rumbo pueden ser explicados con ayuda de la figura 1.

El rumbo deseado es considerado como una referencia (r) entregada por un operador (timonel) o por un computador externo. El rumbo real del buque es la variable controlada o de salida (c) y es detectada mediante un sensor. La señal (b) entregada por el sensor es restada de la referencia en un comparador para generar una señal de error (e). Esta señal, previa amplificación y modificación, es aplicada al accionador, el que a su vez mueve el timón para corregir la desviación del rumbo, haciendo que el error sea anulado.

La comparación debe ser entre señales de la misma naturaleza, por lo que tanto el comparador como el sensor deben cambiar las variables físicas a otras de índole eléctrica; por ejemplo, voltajes. El error no puede ser anulado instantáneamente, sino que paulatinamente, debido a la dinámica del sistema, entendiéndose por tal la conjunción de leyes y efectos físicos.

Básicamente, hay dos tipos de control de rumbo: Mantenimiento de un curso o trayectoria constante y cambio de curso o maniobra intencional. En el primer caso la referencia es mantenida constante y el sistema de control debe corregir cualquiera diferencia que experimente el rumbo real respecto a aquélla (problema de regulación). En el segundo caso, la referencia es variada en la forma correspondiente al cambio de curso o maniobra que se desea realizar y el buque, representado por la variable

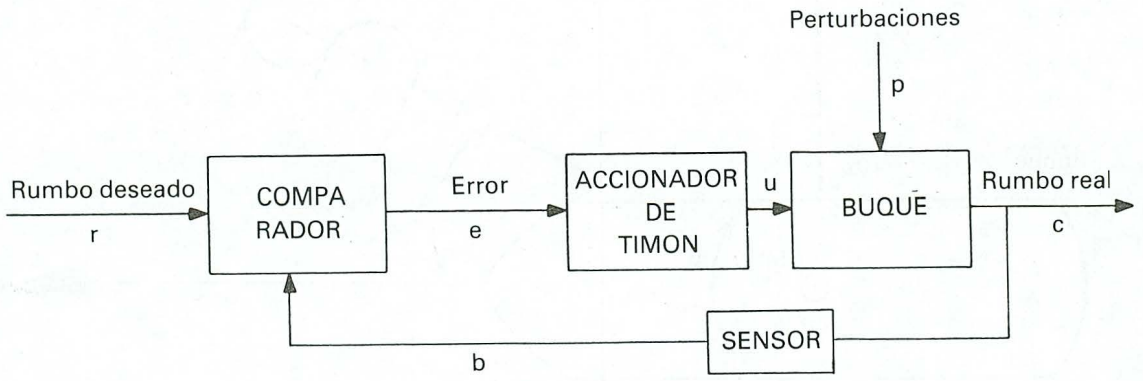


Figura 1. *Control automático de rumbo*

(c) o rumbo real, debe seguirla (problema de seguimiento o traqueo).

Las discrepancias entre rumbo real y referencia se deben principalmente a las perturbaciones exógenas (p) indicadas en la figura 1 y a cambios, inciertos o impredecibles, de parámetros endógenos.

Las perturbaciones exógenas son debidas a olas, vientos, corrientes, mareas y otros, y varían aleatoriamente. Los parámetros endógenos del buque varían con la velocidad y condiciones de carga de éste, con la profundidad del agua, relieve del fondo y otras causas.

En general, todo problema de control automático consta del planteamiento de: Modelo matemático del sistema, restricciones de las variables, perturbaciones exógenas y criterio de comportamiento. En el caso de un buque, el modelo matemático del movimiento consta de ecuaciones diferenciales, deducidas aplicando ecuaciones de Newton a lo largo de los ejes X, Y, Z del buque, de ecuaciones Euler de rotaciones en torno a dichos ejes y de otras expresiones de índole hidrodinámica. Para el control de rumbo interesa principalmente la guiñada (*yaw*) o rotación del buque en torno a un eje vertical (Z), pero los otros movimientos lo afectan también por efectos de acoplamiento.

La figura 2 ilustra el movimiento de una ola, incidente con ángulo A sobre el ángulo de guiñada B y, por ende, sobre la alteración del rumbo.

Las restricciones sobre las variables son de índole física, tecnológica o económica.

El criterio de comportamiento que debe ser optimizado depende del problema (seguridad de navegación, economía de combustible, minimización del tiempo de maniobra o viaje u otros). Las perturbaciones exógenas son representadas usualmente por modelos matemáticos estocásticos.

Autopilotos convencionales

Los autopilotos convencionales tienen como base un controlador PID, como fue explicado antes. La figura 3 ilustra, en forma simplificada, un control de rumbo con autopiloto PID.

El autopiloto (H) recibe señales representativas de la referencia, o rumbo deseado (r) y del rumbo real (c), las substrae y produce una señal de error (e) generando además las acciones proporcional (P), integrativa (I) y derivativa (D). Estas señales multiplicadas con respectivos factores ajustables son sumadas (S) y constituyen la señal de control (u) que se aplica al bloque timón-buque (G) para corregir la desviación del rumbo. En la figura 3 se han omitido, para simplificar, varios otros componentes y funciones de autopiloto.

La acción P es la básica y en ella se genera una señal proporcional o amplificado del error. Su efecto corrector es de signo contrario a la desviación de rumbo y es proporcional a la magnitud de ella. La acción I genera una señal proporcional a la integral del error o a la sumatoria de los errores transcurridos; su misión es anular la desviación final de rumbo si la referencia es constante. La acción D produce una señal proporcional a la derivada del error o a

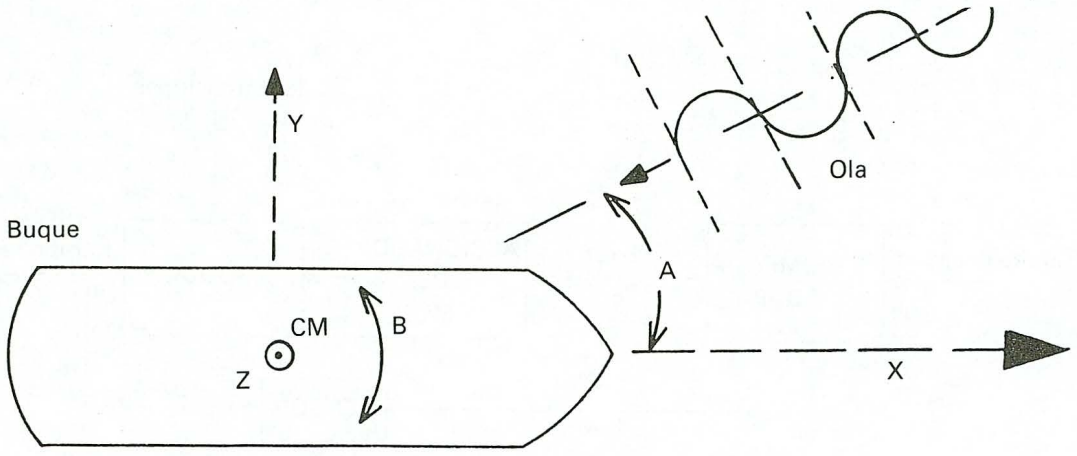


Figura 2. *Efecto de una ola sobre el rumbo*

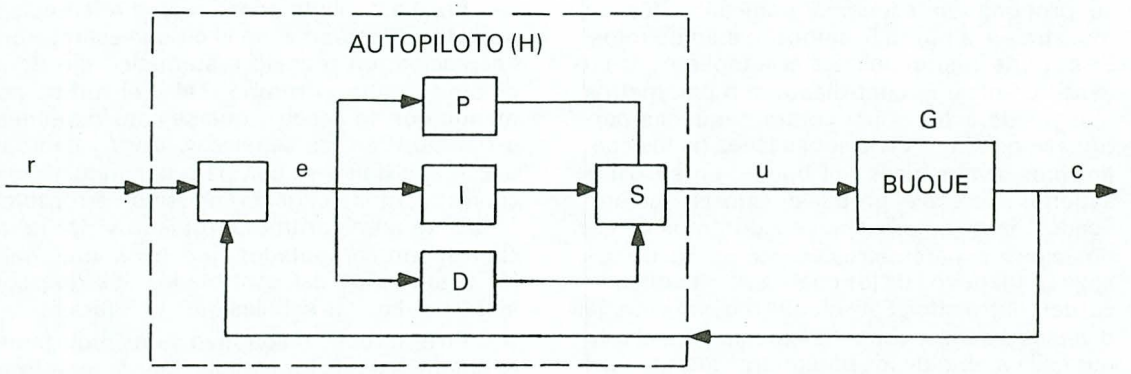


Figura 3. *Control de rumbo con autopiloto PID*

la diferencia entre los errores último y penúltimo; su misión es aumentar la velocidad de respuesta, con efecto, en cierto modo, anticipativo. En los anteriores, la integral y la derivada son aplicadas en el caso de señales continuas (o analógicas) y las sumatorias y diferencias de errores se refieren al caso discreteado en tiempo. Como se indicó, hay controladores realizados en *hardware*, en *software* o mixtos.

El ajuste del controlador PID se efectúa típicamente como sigue. Se adopta un modelo linealizado y simplificado del sistema en alguna situación o punto de operación representativos o de interés especial y son fijados los parámetros o coeficientes de las acciones PID del controlador (autopiloto) indicados por la aplicación de alguno de los varios métodos sencillos de ajuste disponibles.

Con dichos coeficientes fijos, el autopiloto se comporta bien (aunque no óptimamente) si las condiciones de operación del sistema no se apartan mucho de las supuestas para el ajuste.

Como ejemplo meramente cualitativo, en la figura 4 se muestra un caso de desviación del rumbo de un buque de cien metros de eslora sometido a olas periódicas de un metro de altura y largos de onda de 25 metros que inciden en 30 grados respecto al buque.

En esta figura, *a* es la desviación angular sin corrección y *b* es la desviación angular corregida con PID.

Enfoque unificado de autopilotos adaptivos

Como ha sido indicado, los controladores con parámetros fijos no pueden contrarrestar grandes cambios en los parámetros del sistema. En los años cuarenta surgió la idea de diseñar controladores cuyos parámetros se autoajusten, dentro de ciertos rangos, para lograr el mencionado objetivo, lo cual es conocido como control adaptivo.

Hay varios tipos de control adaptivo. Aquí

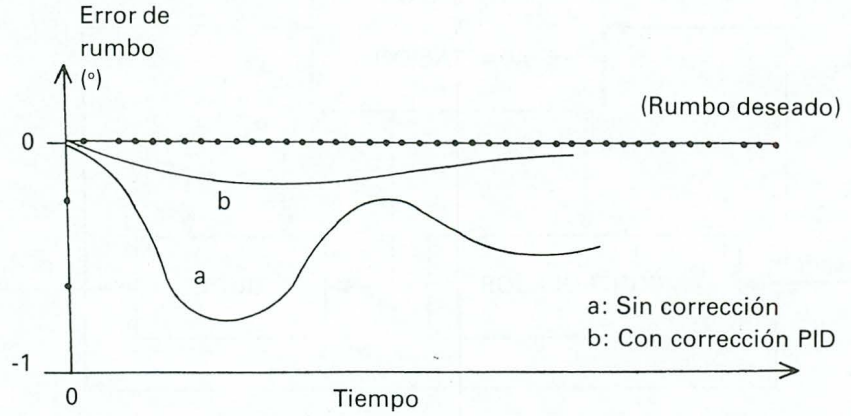


Figura 4. *Error de rumbo sin y con corrección*

se propone un esquema unificado, que se muestra en la figura 5, enfocado a autopilotos. En su parte inferior aparece el autopiloto básico descrito antes. El controlador con parámetros fijos puede actuar bien contra pequeñas perturbaciones (p) y variaciones leves de los coeficientes sistemáticos del buque. En su parte superior aparece el propuesto subsistema unificado adaptivo, que incluye algoritmos de estimación de parámetros, de cómputo de los ajustes adaptivos de los coeficientes (o dinámica) del controlador. Este bloque recibe y entrega diversas señales, como se aprecia en dicha figura. El cambio de los parámetros internos del buque es denotado por *q*.

En el esquema adaptivo de itineración sólo existen las señales *g* y *b*, no habilitándose las señales *a, d* y *f*. La entrada representa mediciones auxiliares y el bloque estimación-adaptación genera una señal de adaptación *b*, dependiendo de aquélla. Es un esquema de adaptación de lazo abierto y el citado bloque podría ser implementado con *software* de lectura simple de tablas (en *hardware* sería con memoria ROM).

En los tres esquemas de control adaptivo descritos a continuación no se requiere, en general, de la señal *g*. Cabe agregar que estos tres tipos de control adaptivos tienen diversas variantes.

En el esquema adaptivo de estructura variable se varía la estructura del bloque estimación-adaptación, de modo que la operación del sistema sea en un llamado modo deslizante, lo que —en principio— asegura un funcionamiento robusto e independiente de los cambios de los parámetros del buque.

En el autopiloto adaptivo con referencia a modelo se programa, en el bloque estimación-adaptación, un modelo matemático fijo de la dinámica entre el rumbo real y el rumbo comando que se desee o que se considere ideal u óptimo. Con las señales *a, d* y *f* recibidas desde el sistema se compara la conducta real con la del modelo, generándose un error total. Mediante un algoritmo apropiado y por iteraciones, son computados nuevos valores para los coeficientes del controlador, los que son ajustados con las señales *b* de la figura 5.

En el autopiloto adaptivo autosintonizante, el bloque estimación-adaptación tiene un modelo apropiado del sistema, en programa, y estima los parámetros del modelo en forma recursiva. Luego usa estos parámetros estimados para computar la ley de control que debe cumplir el controlador (lo que hace vía la señal *b*).

Hay muchos algoritmos para estos esquemas de control adaptivo y muchos estudios y análisis sobre aspectos de estabilidad y convergencia de ellos. Los modelos matemáticos son representados por ecuaciones de diferencia, fáciles de programar en microcomputadores.

En general, los problemas de control adaptivo envuelven dos etapas: La identificación de modelos y estimación de parámetros del sistema controlado; los algoritmos de ajuste y modificación de los coeficientes del controlador. Un tratamiento adecuado de estos temas queda fuera de los límites de este artículo y basta decir que hay muchos métodos para realizarlos.

Asimismo, hay diversos modelos para representar las perturbaciones y sus efectos sobre naves, como —por ejemplo— el Espectro

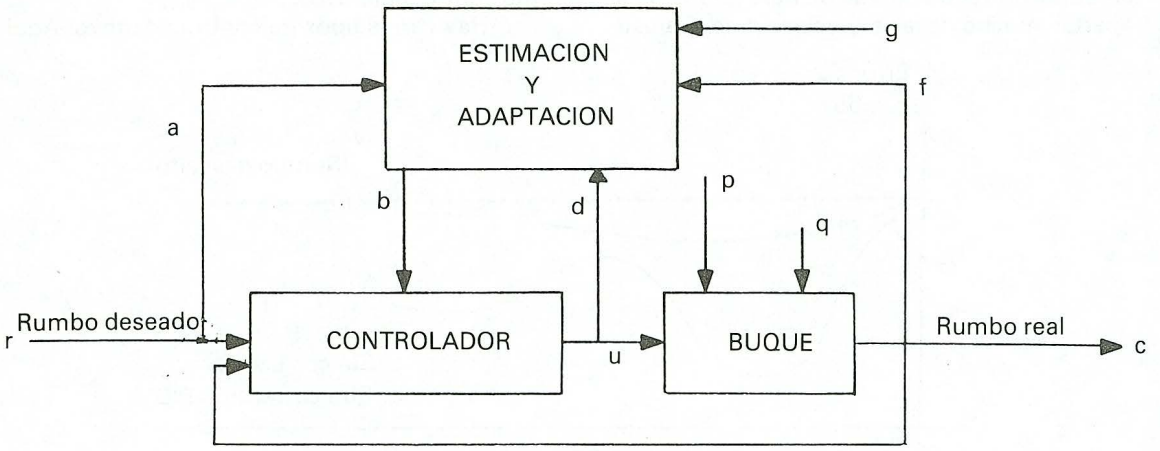


Figura 5. *Esquema unificado de autopilotos adaptivos*

de Bretschneider, de olas en función de velocidades de vientos.

También quedan fuera de este artículo los filtros (como los de Kalman y sus derivados) para suavizar las estimaciones del rumbo, la velocidad de guiñada y la velocidad de desviación lateral.

La figura 6 ilustra comparativamente una corrección de rumbo con autopiloto PID convencional y con autopiloto adaptivo. Las curvas son meramente cualitativas y para una cierta condición.

Ejemplos de autopilotos adaptivos

Källstrom y otros (1979) han presentado el diseño, resultados de simulaciones y pruebas reales en petroleros grandes, de dos tipos de autopilotos adaptivos. En ambos tipos se usa un regulador autosintonizante y un regulador de estructura variable para giros. Además, ambos usan itineración de ganancia dependiente de la velocidad para acelerar la respuesta.

El tipo más simple emplea mediciones de rumbo y de velocidad; los comandos al timón se generan por autosintonía en navegación normal y por estructura variable en maniobras de giro.

En el segundo tipo rige lo expuesto en el párrafo anterior, pero además tiene un filtro de Kalman y sensores auxiliares para medir la velocidad de guiñada, las velocidades de desviación lateral de proa y popa y el ángulo del timón. Con todas las señales de entrada, el filtro Kalman genera estimaciones confiables de rumbo, guiñada, velocidades de desviación lateral y otras señales. En el citado trabajo se concluye que estos autopilotos adaptivos funcionan muy bien en diferentes condiciones de carga, velocidad y condiciones ambientales y de navegación. Además, permiten mayor seguridad y considerable economía de operación de los buques, debido a mejor control e incremento de velocidad y reducción de pérdidas por timoneo (*rudder drag*). Tampoco exigen, como los autopilotos convencionales, cuidadosos ajustes y cambios de éstos para compensar olas, vientos, corrientes, velocidad, balance, estiba, calado y profundidad del agua.

Van Amerongen (1984) describe la aplicación de control adaptivo con referencia a modelo en autopilotos. Discute modelos matemáticos del sistema y de las perturbaciones, define ciertos criterios de comportamiento óptimo e incluye algoritmos de identificación y estimación. En este trabajo son presentados resultados con simulación híbrida, con modelo a escala en estanque experimental y pruebas en buques, todos los que confirman las propiedades del autopiloto adaptivo y sus ventajas respecto a los convencionales, incluyendo ahorro de combustible de hasta un cinco por ciento. Finalmente, emplea un algoritmo de filtrado Kalman modificado que, junto con autopilotos con control adaptivo con referencia a modelos permiten economía de combustible, fácil ajuste y maniobrabilidad.

Arie y otros (1986) presentan un sistema de control adaptivo de rumbo, empleando técnicas de gradiente y adaptación con referencia a modelo, para los modos de mantenimiento y de cambio de rumbo. Describen los algoritmos empleados y los experimentos en un carguero de 6.400 toneladas. El sistema permite un ahorro energético de 1 a 3,5 por ciento y mejoría en la maniobrabilidad.

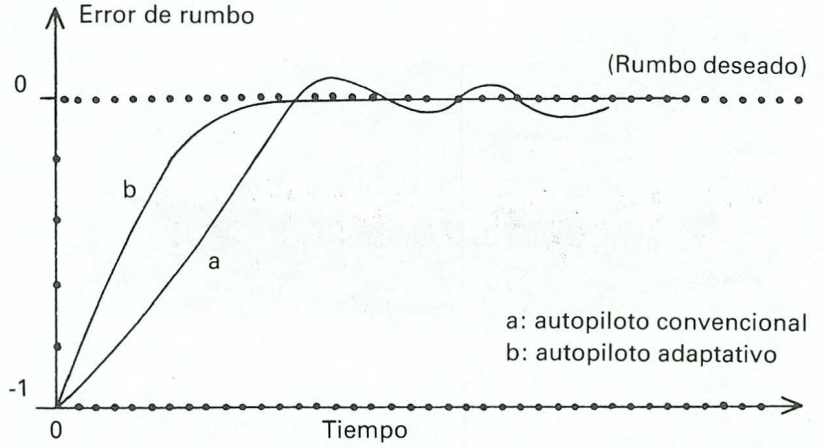


Figura 6. *Corrección de rumbo con autopiloto convencional (a) y adaptivo (b)*

Técnicas venideras para autopilotos

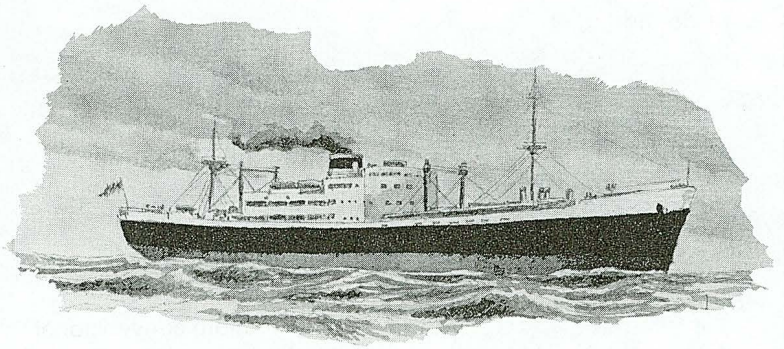
Hay avances muy rápidos en electrónica, automática, inteligencia artificial, robótica autónoma y otras áreas y es previsible que diversos métodos y técnicas de esas disciplinas sean aplicados en autopilotos tanto aislados como componentes de un sistema integrado de navegación.

El autor y sus colaboradores han investigado diversos esquemas de control por aprendizaje, control neural, control experto y otros, los que son aplicables en variados sistemas, incluyendo autopilotos. Todos estos tipos de controles se enmarcan en el esquema unificado de la figura 5 propuesto por el autor.

Conclusiones

Como contribución principal ha sido presentado un enfoque y esquema unificado para el estudio y análisis de autopilotos adaptivos de buques. El esquema permite englobar en una misma estructura los diversos tipos de autopilotos adaptivos existentes o publicados y constituye, además, un marco para futuros desarrollos en dichos equipos o sistemas.

Como contribución secundaria, pero indispensable, se ha presentado una visión panorámica y gradual sobre autopilotos navales, su ámbito y otros temas conexos.

BIBLIOGRAFIA

— **Amerongen, J. van**: "Adaptive steering of ships - A model reference approach", en *Automática*, enero 1984, pp. 3-14.
— **Arie, Tatsuo, et al**: "An adaptive steering system for a ship", en *IEEE Control systems magazine*, octubre 1986, pp. 3-8.
— **Eidsvik, K.J.**: "Wind-wave generation of ocean current: On model identification", en *IEEE J. of oceanic engineering*, abril 1988, pp. 43-49.
— **Hernández S., J. L., et al**: "Control adaptivo-anticipativo del rumbo de un buque", en *Gestión tecnológica*, UTFSM, 22/23, 1990, pp. 3-10.
— **Källstrom, C.G., et al**: "Adaptive autopilots for tankers", en *Automática*, mayo 1979, pp. 241-254.
— **Mallström, D.**: "Automatización integrada a bordo", *Revista ABB* Nº 4/1989, pp. 34-38.
— **Morishita, H.M.** y **Brinati,H.L.**: "Aplicacâo de um controlador auto-ajustavel em uma intalacao propulsora marítima", en *Segundo Congreso Latinoamericano de Automática*, 1986, pp. 735-739.
— **Triantafyllow, M.S., et al**: "Real-time estimation of ship motions using kalman filtering techniques", en *IEEE J. of oceanic engineering*, enero 1983, pp. 9-20.