

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN



**CONTROL DE LA POSICIÓN DE UN CAÑÓN PARA TIRO ANTISUPERFICIE
ABORDO DE UNA CORBETA MISILERA**

Tesis para optar el Grado de:

Magíster en Ingeniería de Control y Automatización

Autor: Capitán de Fragata Pedro José Pablo Iriarte Chávez

Asesor: Dr. Ing. Juan Javier Sotomayor Moriano

Jurado

Dr. Ing. Antonio Manuel Morán Cárdenas

Contralmirante Enrique Luis Arnáez Braschi

Lima-Perú

2019

RESUMEN

Los cañones de artillería de las corbetas misileras con que cuenta la Marina de Guerra del Perú, poseen un sistema de control de tiro con tecnología analógica de los años 80's, que actualmente presentan una serie de desventajas respecto al gran avance tecnológico de los sistemas electrónicos y digitales, quedando en desuso y con gran obsolescencia técnica.

El tiro antisuperficie se realiza con el cañón 76 mm. instalado a proa de la cubierta principal de las corbetas misileras; el cual lo ejecuta en forma automática de acuerdo al seguimiento que efectúe el radar de control de tiro, y la solución al problema de tiro que efectúe el calculador del sistema de control.

El sistema de control de tiro recibe las señales provenientes de los diversos sistemas periféricos del buque, así como de las tablas de tiro, para realizar el cálculo y determinar el ángulo de elevación y el ángulo de ronza con que debe posicionarse el cañón para ejecutar el disparo.

En la presente tesis se realiza una introducción a la corbeta misilera y sus características, armamento y sensores; se explica en qué consiste el tiro antisuperficie y sus particularidades; asimismo, se analiza la problemática con que se cuenta para controlar la posición del cañón y realizar el tiro adecuadamente. Finalmente, se plantean técnicas de control para determinar la posición del cañón a fin de realizar tiro antisuperficie.

El trabajo consta de la simulación de un sistema de control con calculador que determine cuál es el ángulo de elevación y ángulo en ronza del cañón para ejecutar el tiro en la posición deseada donde se encuentre el blanco. El principal aporte de la presente tesis es el desarrollo del sistema de control de la posición de un cañón, que permite alcanzar los requerimientos para ejecutar un tiro antisuperficie, el cual podría ser implementado en base a tecnología actual.

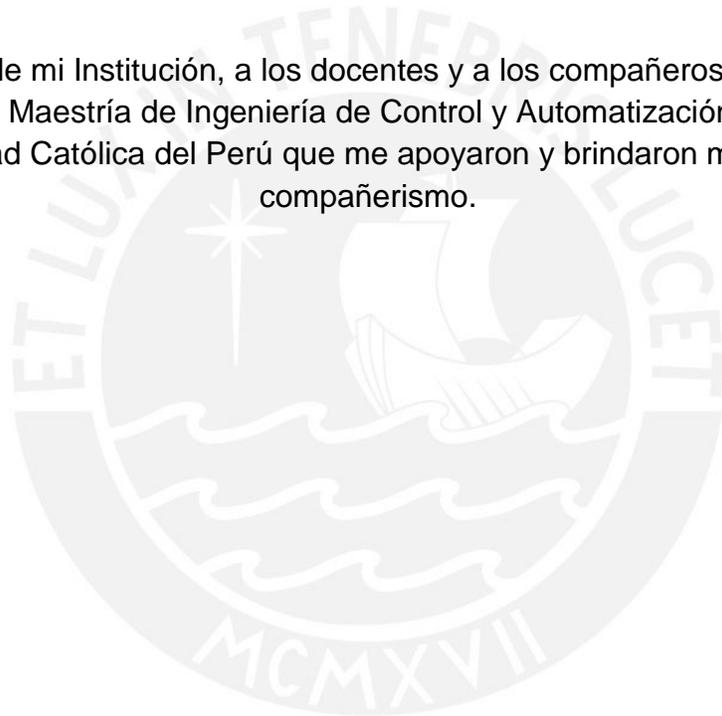
Palabras clave: control tiro, cañón antisuperficie, posición cañón.

DEDICATORIA

A mi esposa e hijos, que contribuyeron con su comprensión al desarrollo de esta investigación y al gran sacrificio demostrado en toda la duración del programa.

A mi querida Marina de Guerra del Perú, que me brinda continuamente la oportunidad de seguir creciendo profesionalmente.

A los colegas de mi Institución, a los docentes y a los compañeros de estudios del programa de la Maestría de Ingeniería de Control y Automatización de la Pontificia Universidad Católica del Perú que me apoyaron y brindaron muestras de compañerismo.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN:	7
1. LAS CORBETAS MISILERAS DE LA MARINA DE GUERRA DEL PERÚ Y SU CAÑÓN ANTISUPERFICIE	10
1.1 Contexto histórico y actual de las corbetas misileras.	10
1.2 Descripción y características actuales del sistema de control de tiro antisuperficie a bordo de las corbetas misileras.	13
1.3 Descripción y características del cañón Oto Melara 76/62 mm.	15
1.4 Análisis de la problemática relacionada con la solución del problema de tiro y del control del cañón.....	21
1.5 Descripción del problema.	27
1.6 Conclusiones del capítulo.....	27
2. TÉCNICAS DE CONTROL QUE POSIBILITARÍAN EL CONTROL ADECUADO DEL CAÑÓN ANTISUPERFICIE	28
2.1 Conceptos previos relacionados a las técnicas de control para la solución del problema.....	28
2.2 Análisis de las técnicas de control que posibilitarían el control adecuado del cañón antisuperficie 76/62 mm.....	30
2.3 Objetivos a alcanzar.	34
3. CONTROL DEL MOVIMIENTO DEL CAÑÓN ANTISUPERFICIE	36
3.1 Análisis de las ecuaciones al problema de tiro y modelado del cálculo de tiro del cañón Oto Melara 76/62 mm.	36
3.2. Solución matricial para la estabilización y paralaje.....	40
3.3. Validación del modelo obtenido.....	47
3.4. Diseño del controlador.	49
4. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
4.1 Pruebas de simulación.....	55
4.2 Comparación y análisis de resultados obtenidos.	62
4.3 Conclusiones. -	65
CONCLUSIONES	67
ANEXOS	69
BIBLIOGRAFÍA	70

Anexo A.....	72
Tabla de Tiro del Cañón 76mm.....	72
Anexo B.....	79
Factores externos que afectan el movimiento de un buque	79



INDICE DE ABREVIATURAS

CTC: Control de Torque Computarizado

D-H: Denavit-Hartenberg

DOF: Grados de libertad

GPS: Global Position System

MIMO: múltiples entradas y múltiples salidas

MPC: Control predictivo por modelo

Mv: Marcación verdadera

PD: Controlador Proporcional Derivativo

PID: Proporcional Integral Derivativo

PMA: Punto de máxima aproximación

PSP: Peso estándar del proyectil

Rv: Rumbo verdadero

SCT: Sistema de control de tiro

SISO: una entrada y una salida

TSP: Temperatura de la pólvora

V: Velocidad

VID: Velocidad inicial de diseño del cañón

Vo: Velocidad inicial

VVITP: Variación de la velocidad inicial por temperatura de la pólvora

INTRODUCCIÓN:

Los buques de guerra, a diferencia de buques mercantes, realizan navegaciones de todo tipo, debiendo contar con sistemas de armas de defensa antisuperficie para una adecuada protección de los intereses marítimos y misiones establecidas.

Los sistemas de armas están constituidos básicamente por elementos sensores, actuadores, cálculo de armas y las armas propiamente dichas. Todos estos en cantidades y niveles de tecnología diferentes, de acuerdo al tamaño del buque y su grado de sofisticación.

Las corbetas misileras con que cuenta la Marina de Guerra del Perú fueron construidas en Francia y puestas al servicio entre los años 1980 y 1981. Cuentan con diversos sistemas, entre éstos están los sistemas de detección mediante radar. Los sistemas de detección de radar permiten visualizar los contactos de superficie e identificar posibles blancos de oportunidad a los cuales tenga que neutralizar para cumplir cualquier misión encomendada. Para realizar las acciones mencionadas, las corbetas cuentan con cañones de artillería instalados en la cubierta principal, los cuales son telecomandados en forma remota desde el puesto de comando y control de la unidad.

La búsqueda de los contactos de superficie a bordo del buque es realizada por el radar de navegación, el cual proporciona la ubicación del contacto de superficie. Con la información obtenida del radar, el Oficial de guardia discrimina e identifica cuál contacto puede ser clasificado como hostil, a fin de prestarle más atención, y si las circunstancias lo ameritan, hacer uso de las armas para neutralizarlo.

En ese sentido, el contacto de superficie identificado como hostil, presenta al operador del radar los datos de rumbo o dirección (en grados sexagesimales), velocidad (en nudos), marcación (en grados sexagesimales) y distancia (en millas náuticas) desde el buque propio. Estos datos, sumados a la dirección e intensidad

del viento, presión atmosférica y correcciones propias del cañón, son introducidos al sistema de control de tiro, para resolver el problema de tiro. La solución del problema de tiro implica el cálculo del ángulo de elevación y ángulo en azimut de ronzá del cañón, para realizar el disparo y dar en el blanco.

El control automático representa una alternativa de control para determinar la posición del cañón, dado que puede aplicarse a un sistema MIMO como éste. Este control permite considerar conocimientos expertos para realizar un tiro antisuperficie dadas las condiciones propias de la operación, las cuales se recopilan y varían de acuerdo a las circunstancias presentadas en las tablas de tiro del cañón, con el fin de realizar un tiro efectivo.

En el presente trabajo se desarrollará el análisis de la problemática en la solución al problema de tiro antisuperficie con el cañón de 76/62 mm. de las corbetas misileras de la Marina de Guerra del Perú y su solución aplicando técnicas de control que permitan determinar la posición del mencionado cañón en elevación y ronzá.

En el capítulo 1 se describen las características de las corbetas, el armamento y los sensores con que cuenta, el sistema de control de tiro y sus particularidades, así como también se explica cuáles son los procedimientos para realizar un tiro antisuperficie contra un blanco.

Posteriormente, en el capítulo 2 se describen las técnicas de control avanzado que podrían permitir controlar la posición del cañón, es decir el estado del arte encontrado para buscar la mejor alternativa para desarrollar el control y plantear los objetivos de la tesis.

Luego, en el capítulo 3 se desarrolla el modelamiento del cálculo de tiro del cañón Oto Melara 76/62 mm, la solución matricial para la estabilización y paralaje del citado cañón, la validación del modelo obtenido y el desarrollo del controlador.

Finalmente, en el capítulo 4 se desarrollan las pruebas de simulación, la comparación, el análisis de los resultados obtenidos y las conclusiones del trabajo realizado.



1. LAS CORBETAS MISILERAS DE LA MARINA DE GUERRA DEL PERÚ Y SU CAÑÓN ANTISUPERFICIE

1.1 Contexto histórico y actual de las corbetas misileras.

Los buques de guerra son barcos que son diseñados para fines específicos, agregándoseles características especiales como movilidad, velocidad, armamento y autonomía. Existen buques de guerra de diferente tipo como las fragatas, navíos, corbetas, submarinos, y otros de índole específico y multirol.

La principal característica que tiene un buque de guerra, son los sistemas de combate, los cuales son un “conjunto de equipos o sistemas donde sus distintos subconjuntos están interconectados de manera tal que su funcionamiento total sea lo más eficaz posible. Esta definición de Sistemas de Combate es amplia, debido a que cualquiera sea su dimensión, su finalidad será conseguir el efecto deseado sobre el enemigo” (Andaluz & Avilez, 2013).

La corbeta es un buque de guerra cuyo desplazamiento se encuentra entre 500 y 2,000 toneladas (ver Figura N° 1). Son buques construidos para tareas de vigilancia y defensa de aguas cercanas a la costa, con periodos de operación de corta duración. Cuentan con menor autonomía que una Fragata Misilera, y dispone de mayores medios electrónicos y de combate que una lancha rápida.



Figura N°1.- Corbeta misilera de la Marina de Guerra del Perú
(Imagen fuente Marina de Guerra del Perú)

La Marina de Guerra del Perú cuenta con una serie de buques dentro de su composición, entre los cuales se encuentran las corbetas misileras, unidades navales con características similares entre sí, que fueron parte del proyecto Tiburón, el cual consistió en la construcción para la Armada Peruana, de seis corbetas misileras en astilleros franceses entre los años 1978 y 1981; bautizadas con los nombres de Velarde, Santillana, De los Heros, Herrera, Larrea y Sánchez Carrión.

Las Corbetas Misileras de la Marina de Guerra del Perú cuentan con las siguientes características generales:

- Desplazamiento promedio: 590 toneladas.
- Velocidad máxima: 36 nudos.
- Dotación: 50 tripulantes.
- Eslora: 63 metros
- Manga máxima: 9.10 metros.
- Puntal: 5.30 metros.

Para su movilidad y energía cuenta con cuatro motores de propulsión y dos generadores eléctricos de combustión Diesel. Propulsa a través de cuatro hélices independientes entre sí.

Posee un radar de navegación con excelente discriminación para discernir contactos pequeños y con capacidad de traqueo automático de 100 contactos desde 0.25 a 40 millas náuticas.

El radar recibe como señales de interfase las señales de girocompás (rumbo del buque propio) y GPS (velocidad y posición en latitud y longitud del buque propio).

Este radar de navegación efectúa la búsqueda y detección de contactos de superficie dentro de las 40 millas náuticas, dependiendo del tamaño del contacto y de las condiciones atmosféricas en el área de operación, efectuando el traqueo, es decir determina los datos de marcación verdadera y distancia al buque propio, así

como el rumbo y velocidad del contacto, presentándola en el display del radar, tal como lo muestra la figura N° 2.

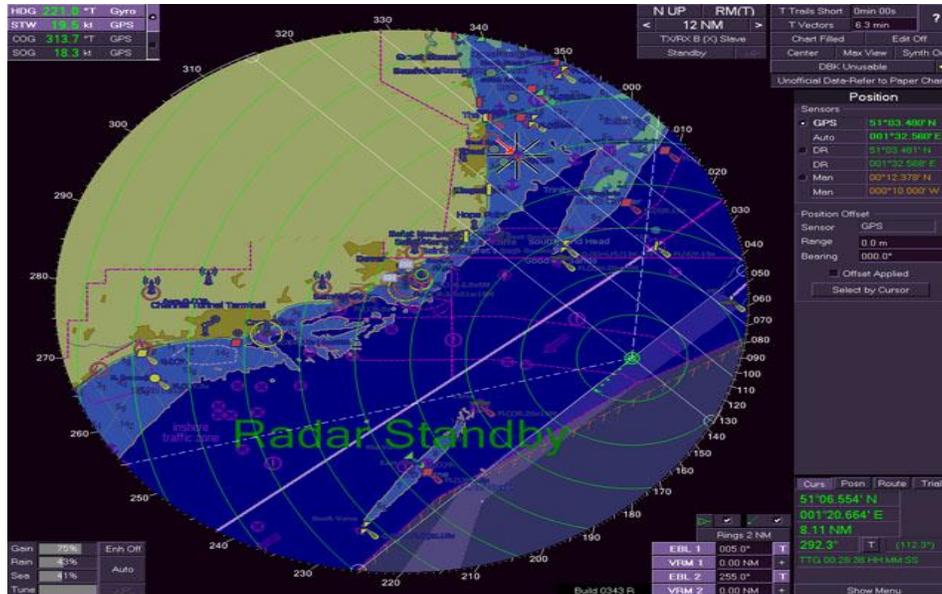


Figura N°2: Display del radar de navegación en escala de 12 millas náuticas en pantalla (Imagen fuente propia)

El operador del radar de navegación verifica si aparece algún contacto en la pantalla, para detectarlo y proceder con el traqueo respectivo. Cuando se haya traqueado (seguimiento de un contacto, determinando el rumbo y velocidad del mismo) el contacto, aparecerá los siguientes datos en la pantalla radar al seleccionarlo:

- Marcación verdadera (Mv) al contacto desde el buque propio.
- Distancia en millas náuticas (d) al contacto desde el buque propio.
- Rumbo verdadero (Rv) del contacto.
- Velocidad (V) en nudos del contacto.
- Punto de Máxima Aproximación (PMA) en millas náuticas al buque propio.

Asimismo, en cuanto al armamento instalado, la corbeta misilera posee misiles antisuperficie y dos cañones de artillería, uno de 76/62 mm. y otro de 40/70 mm. instalados en la proa y popa del buque respectivamente. El sistema de armas de la corbeta misilera se encuentra interconectado entre sí a través de consolas y tableros que permiten realizar la interfase con el operador de armamento y el de operaciones.

1.2 Descripción y características actuales del sistema de control de tiro antisuperficie a bordo de las corbetas misileras.

El sistema de armas a bordo de las unidades tipo corbeta misilera (Alarco, 2014) está compuesto por un radar de búsqueda o vigilancia, un radar de control de tiro, un radar de navegación, una consola de vigilancia, una consola de tiro y un puesto de director óptico; los cuales en conjunto son denominados Sistema Vega II (ver figura N°3).

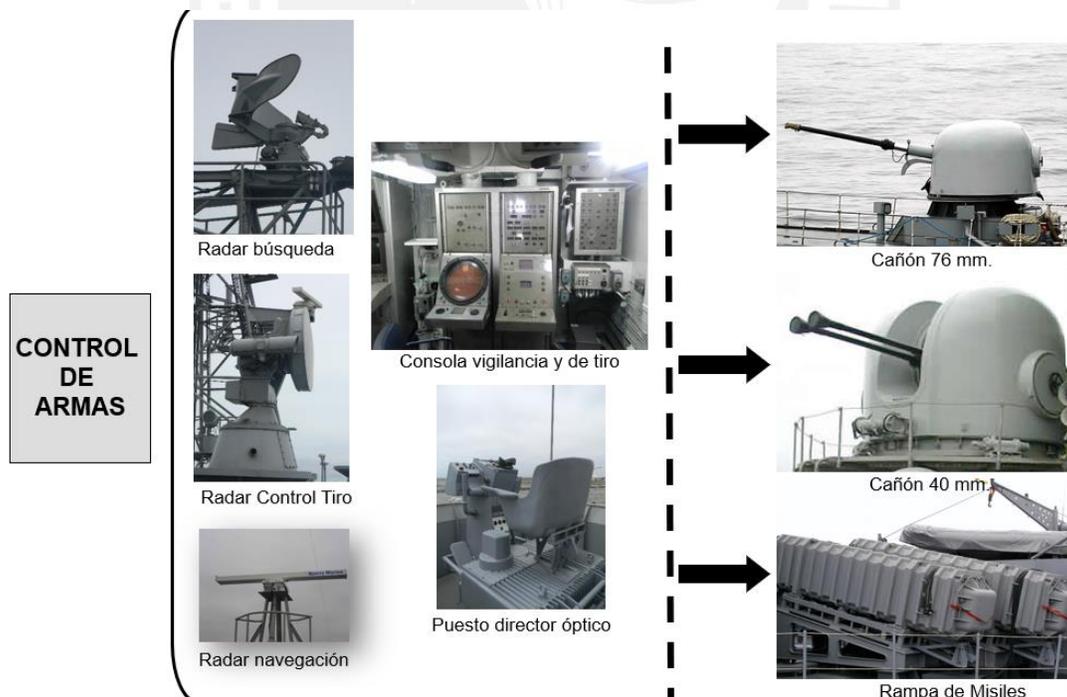


Figura N°3: Composición del Sistema de armas Vega II (Imagen fuente propia)

El sistema de armas forma parte de un ciclo de toma de decisiones (Alarco, 2014), que se realiza cada vez que debe emplearse un arma (ver figura N°4).

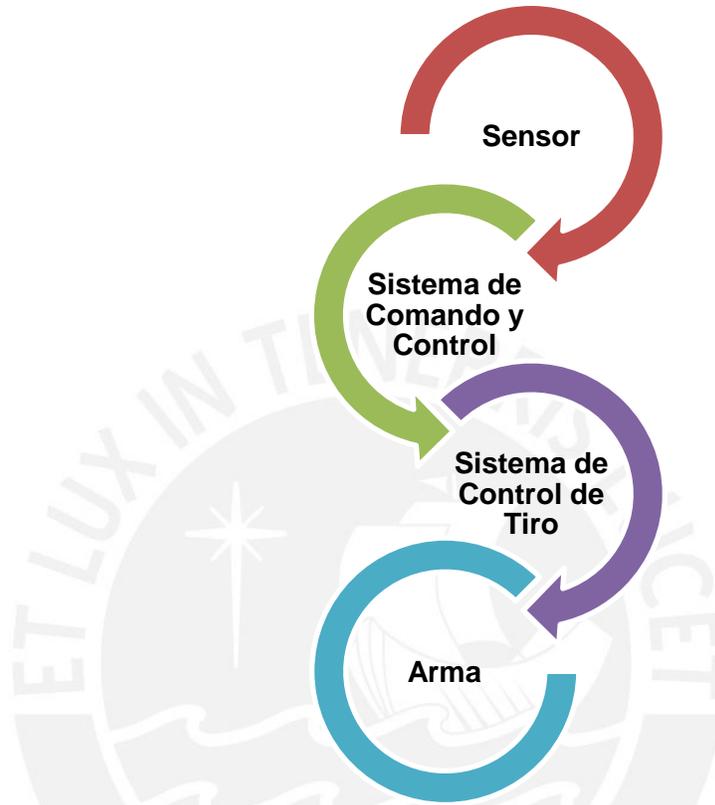


Figura N°4: Ciclo del empleo de un arma a bordo del buque (Fuente propia)

El ciclo inicia cuando el sensor detecta el contacto de superficie, lo ubica y traquea, para posteriormente empleando el sistema de comando y control, el cual está compuesto por computadores y presentaciones visuales que le permiten al comandante tomar la mejor decisión en una situación, se pueda identificar como hostil o neutral. En el caso sea identificado como hostil, pasará a cargo del sistema de control de tiro, el cual realiza la solución al problema de tiro.

Al momento del tiro, el operador deberá insertar de manera manual los parámetros de tiro en la consola BCH. Para el tiro contra superficie se utilizan los siguientes parámetros:

- Temperatura y presión atmosférica.
- Dirección y velocidad del viento verdadero.
- Humedad relativa.
- Corrección de velocidad inicial
- Selector de balística contra superficie
- Correcciones arbitrarias en alcance y deflexión.

Con todos estos datos, el calculador debe resolver las fórmulas juntamente con los datos de la posición del blanco, los datos propios y los de la tabla de tiro; y de esta manera proporcionar a través de una interface automática, el mejor ángulo de elevación y el ángulo de ronza al cañón de artillería para que pueda batir el blanco. Es decir, resuelve los problemas de cinemática, balística, paralaje y conversión de coordenadas para el tiro.

Luego de realizar el tiro, se procederá a efectuar las correcciones arbitrarias en alcance y deflexión, para lo cual se dispone del radar o de la cámara de tv, los cuales nos darán la posición del impacto.

Estas correcciones en alcance se realizan en metros, mientras que para correcciones en deflexión la unidad de medida angular, es el mil angular o mil artillero (Sánchez, 2004), y equivale a 1 mili radián.

1.3 Descripción y características del cañón Oto Melara 76/62 mm.

El cañón ubicado a modo de montaje o torreta en la proa de las corbetas misileras, es de origen italiano, de la empresa Oto Melara. Es un cañón naval de 76/62 mm. de calibre, ampliamente utilizado por marinas de todo el mundo desde el año 1960 (ver figura N°5). Este calibre le permite al cañón ser empleado para realizar fuego antisuperficie de mediano alcance, fuego antiaéreo de corto alcance y fuego contra costa. También puede ser empleado como defensa antimisil. Emplea un sistema de

recarga compacto, que abastece al cañón con munición del tipo perforante, incendiaria y de fragmentación.



Figura N°5: Vistas del Cañón Oto Melara 76/62 mm
(Imágenes fuente Marina de Guerra del Perú)

Este cañón es de automático, y requiere de un sistema de control de tiro que mantenga el seguimiento de los contactos designados como blanco, a fin de resolver el problema de tiro de acuerdo a la estabilización y movimiento propio de la plataforma. Es capaz de disparar hasta 80 tiros por minuto.

Está provisto de un mando de distancia totalmente eléctrico, con diodos de control completamente automático, cuyo elemento de potencia está constituido por motores eléctricos del tipo de rotor impreso de elevada potencia específica y de baja inercia. Dichos motores no requieren de tiempo de excitación y por ello pueden ponerse en marcha inmediatamente que lo requiera la situación operativa.

La electrónica del sistema de control está formada en gran parte, por circuitos impresos. Cuenta con sensores de proximidad para la ronza y elevación.

Cuando el montaje está en funcionamiento solo puede ser controlado a distancia, no se puede ejecutar a mano ninguna operación. Los servos mecanismos de ronza y elevación son de funcionamiento eléctrico con diodos de control (ver figura N°6).

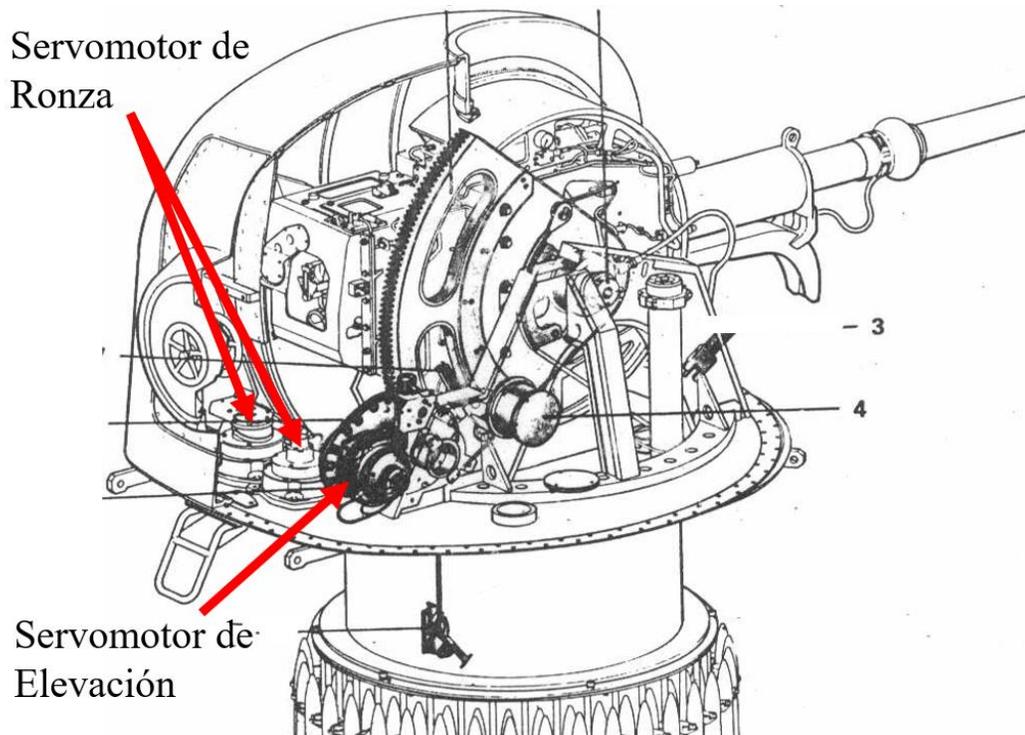


Figura N°6: Ubicación servomotores ronza y elevación del montaje 76/62mm.
(Imagen del Manual de empleo del cañón 76/62 mm.)

Las características generales del cañón 76/62 mm. son las siguientes:

- Peso: 7.5 ton.
- Longitud caña: 4m. x 71 cm. X 20 mm. (4700 mm)
- Munición: 76 mm x 900 mm.
- Ángulo vertical: $-15^{\circ}/+85^{\circ}$ (velocidad de giro $35^{\circ}/s$)
- Ángulo horizontal: 360° (velocidad de giro $60^{\circ}/s$)
- Cadencia de tiro: 80 disparos por minuto.
- Velocidad máxima: 925 m/s
- Alcance máximo antiaéreo: 6 km.
- Alcance máximo antisuperficie: 10 km.
- Longitud de la caña: 5 metros.
- Altura de la caña (referencia de la base): 1 metro.

En cuanto a la balística exterior del cañón 76/62 mm. (Alarco, 2014), se encarga de estudiar las armas de fuego, la dirección y el alcance de los proyectiles que disparan, así como los efectos que influyen en su vuelo; ésta se centra en el estudio de las fuerzas y trayectorias, teniendo como principales factores la temperatura y presión atmosférica, entre otros datos que ocurren en la fase correspondiente al vuelo del proyectil. La forma, calibre, peso, velocidades iniciales, rotación, resistencia del aire y gravedad constituyen los factores que modifican la trayectoria de un proyectil desde el momento en que sale del cañón hasta que alcanza el blanco (ver figura N° 7).

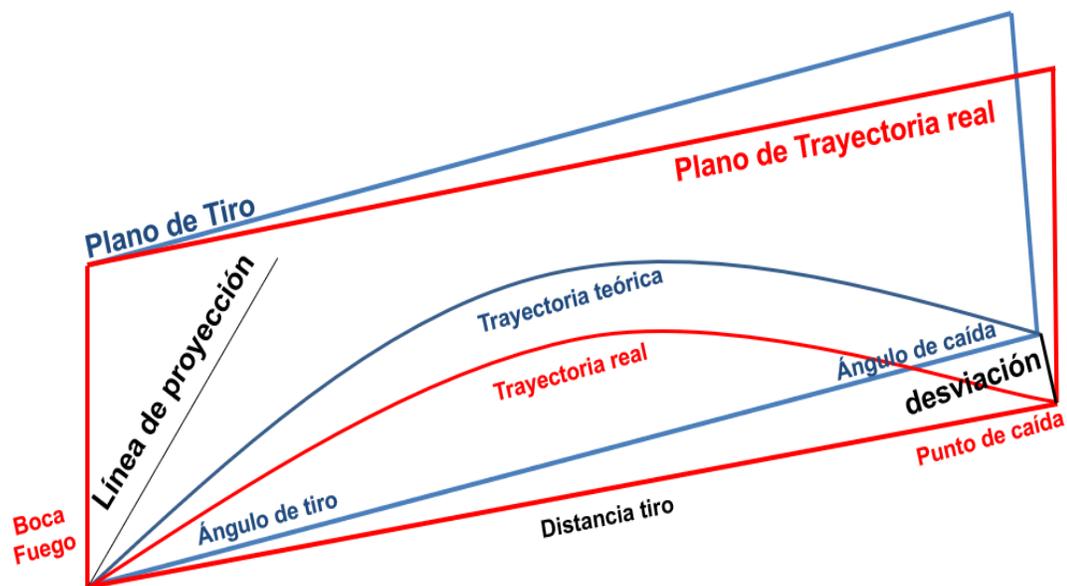


Figura N°7: Trayectoria real vs Trayectoria teórica del proyectil
(Imagen de Alarco, 2014)

Es conveniente recordar que en los estudios históricos realizados por Galileo Galilei en los años 1638, y posteriormente deducidos matemáticamente por Isaac Newton a través de ecuaciones, se derivó el movimiento parabólico de un objeto. Estas ecuaciones son las que se deducen del lanzamiento de proyectiles, en que la trayectoria descrita por un proyectil es una curva específica llamada parábola. El tiro parabólico se puede estudiar como resultado de la composición de dos movimientos

a lo largo del eje x e y , demostrando que los proyectiles describen en el vacío un arco parabólico por efectos de gravedad ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$).

Isaac Newton, mediante la descripción de la ley de la gravedad (Landau et al., 1991), explicó la causa y determinó la resistencia del aire en el movimiento curvilíneo en los proyectiles. Este cálculo ha sido superado por el uso de tablas, derivadas de disparos experimentales. Las fórmulas y tablas para balística exterior de cada nuevo tipo de cañón son empíricas y se comprueban con experimentos reales realizados por el fabricante en talleres.

Las condiciones estándar son una serie de condiciones arbitrarias fijadas como existentes al momento de diseñar y elaborar la tabla de tiro de un cañón de artillería por cada fabricante. Éstas se encuentran indicadas en la parte explicativa de las tablas de tiro, y abarcan los siguientes aspectos:

- a) Viento cero.
- b) Blanco inmóvil.
- c) Tirador inmóvil.
- d) Velocidad inicial de diseño del cañón (VID).
- e) Temperatura, humedad y presión del aire (densidad del aire).
- f) Temperatura de la pólvora (TSP).
- g) Variación de la velocidad inicial por temperatura de la pólvora (VVITP).
- h) Peso estándar del proyectil (PSP).
- i) Coeficiente balístico del proyectil.
- j) Tirador y blanco en el mismo plano.
- k) Tierra inmóvil y plana.

La diferencia entre las condiciones estándar y las realmente existentes al momento del tiro ocasionan errores de puntería que deben ser corregidos ya sea automáticamente por los sistemas de control de tiro o efectuando manualmente el cálculo de alzas, es decir, determinar el ángulo de elevación y el de ronzá.

Una tabla de tiro es un documento, confeccionado para cada cañón, en la cual se encuentran indicadas cuales fueron las condiciones estándar consideradas para confeccionar dicha tabla, así como cuales son los efectos sobre el punto de caída debidos la diferencia de estas condiciones estándar con las existentes realmente al momento de efectuar el tiro, lo que nos permitirá realizar el cálculo de alzas, para apuntar correctamente los cañones (Alarco, 2014).

Estas tablas de tiro pueden ser incluidas y programadas en sistemas de cómputo y cálculo, para que trabajen con cada sistema de control de tiro.

Para el cañón Oto Melara 76/62 mm. (ver figura N° 8) el fabricante elaboró una tabla de tiro, en condiciones ideales, es decir el cálculo balístico sin balance, cabeceo, rolido o guiñada ni paralaje.



Figura N°8: Cañón Oto Melara 76/62 mm en puerto
(Imagen fuente ITA Otomelara)

La balística interna se encarga de resolver el proceso termodinámico de la explosión que produce el disparo, el movimiento del proyectil a lo largo del ánima del cañón y la determinación de la velocidad inicial del vuelo. Los datos de la balística interna del cañón 76/62 mm. elaborados por el fabricante son los siguientes:

- Tipo de pólvora: M6 + 2.
- Densidad de carga: $\Delta = 0,7139 \text{ kg/dm}^3$
- Reporte de expansión: $p = 6,85$.
- Presión máxima efectiva: $P_m = 3470 \text{ kg/cm}^2$
- Presión efectiva del final de la combustión: 2570 kg/cm^2
- Presión efectiva en la boca: 658 kg/cm^2
- Abscisa del punto de máxima presión: 3,69 dm.
- Abscisa al final de la combustión: 12,42 dm.
- Abscisa en la boca: 41,55 dm.
- Velocidad inicial: 930 m/s.

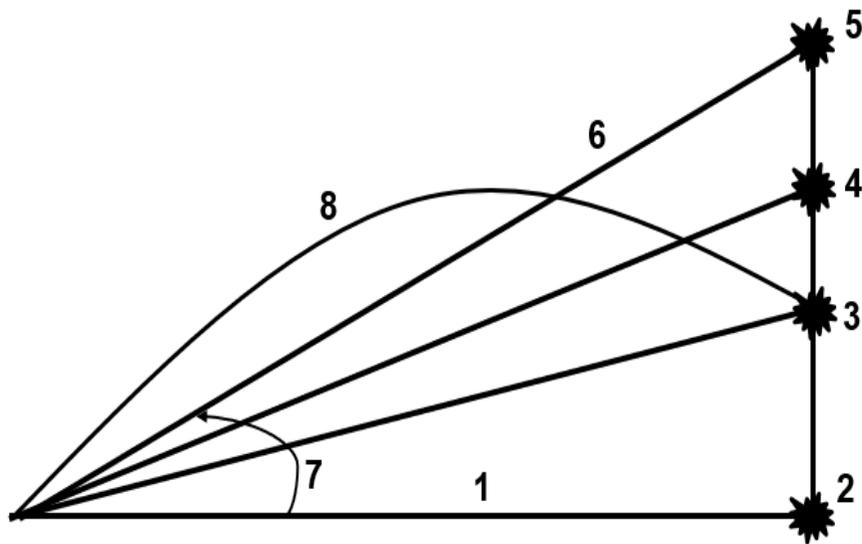
Los datos anteriormente descritos, permiten solucionar en condiciones ideales balístico de acuerdo a las fórmulas de tiro, empleando las tablas de tiro de cada arma (ver Anexo A: Tabla de Tiro para cañón 76/62 mm.).

1.4 Análisis de la problemática relacionada con la solución del problema de tiro y del control del cañón.

Después de haber analizado los componentes del sistema de tiro, se puede inferir que el control de tiro es el proceso completo de utilización del armamento del buque, lo que comprende principalmente al material y personal; así como también los métodos y organización necesaria para infligir al blanco la máxima destrucción en el menor tiempo posible. El control de tiro realizará el proceso de puntería, ubicando la línea de mira sobre el blanco, para calcular el ángulo de adelanto, y apuntar el cañón (Alarco, 2014). Los parámetros serán los siguientes:

- Línea de mira: Será la línea recta que se prolonga desde el cañón hasta el objetivo, esta línea la obtenemos para el tiro contra superficie con el radar cuando traquea el blanco y obtenemos su marcación.
- Línea de tiro: Es la línea recta que va desde el cañón hasta el punto futuro de movimiento del blanco, de tal manera que de acuerdo a su rumbo y velocidad obtenido, se realiza el cálculo del punto en el cual se encontrará para que el proyectil pueda impactar en el blanco.
- Ángulo de adelanto: Es el ángulo formado por la línea de mira y la línea de tiro, la cual demandará una corrección en deflexión.
- Punto actual: Es la ubicación del blanco en marcación y distancia, que será obtenido por el radar, al momento del disparo del proyectil.
- Punto futuro: Es el punto donde se encontrará el blanco al impactar el proyectil, luego del vuelo del proyectil.
- Punto avanzado: Es el punto donde se debe dirigir el cañón luego de haber realizado las correcciones balísticas, las cuales se generan al cambiar las condiciones estándar.
- Punto de tiro: Es el punto donde se debe dirigir el cañón luego de haber realizado las correcciones arbitrarias, las cuales se generan al haber espoteado el tiro y realizar los cálculos de corrección en alza y deflexión.

En ese sentido, se determinarán los parámetros antes mencionados, con la finalidad de que el proyectil impacte en el blanco (ver figura N° 9).



- | | | | |
|----|-----------------|----|----------------------------|
| 1. | Línea mira. | 5. | Punto de tiro. |
| 2. | Punto actual. | 6. | Línea de tiro. |
| 3. | Punto futuro. | 7. | Ángulo de adelanto. |
| 4. | Punto avanzado. | 8. | Trayectoria del proyectil. |

Figura N° 9: *Parámetros básicos del tiro (Imagen fuente propia)*

El sistema de control de tiro contra superficie, se deberá cumplir en siguiente proceso (Andaluz-Avilez, 2013): obtener la posición del blanco con el radar, calcular los ángulos de adelanto, estabilización del cañón con los datos de guiñada, rolido y balance, órdenes al cañón y finalmente correcciones de acuerdo a la caída del proyectil.



Figura N°10: *Proceso para el tiro contra superficie* (Andaluz-Aviles, 2013)

Para realizar los cálculos se tomará como referencia un punto ubicado en el buque, tanto para las correcciones balísticas, como para las de estabilización.

Para el presente trabajo, se abarca solamente la medición de la marcación al blanco de superficie, midiendo el ángulo entre el norte verdadero. Ahora bien, el equipo que sirve para establecer la línea de mira se encuentra hecho firme en la cubierta del buque y consecuentemente participa de los movimientos de guiñada, rolo y cabeceo, detallados en el Anexo B; consecuentemente la línea de mira se moverá conjuntamente con el buque, lo que obligará a estar corrigiéndola constantemente para mantener la puntería, dando lugar a mediciones erróneas; para evitar este problema es necesario independizar a la línea de mira de los movimientos del buque, es decir estabilizarla.

Con respecto a las correcciones por paralaje; el problema de tiro es solucionado en base del posicionamiento de un sistema de referencia ubicado en el tirador y que

se denomina Punto de Referencia. Se supone que las estaciones de puntería y fuego se encuentran en este punto, situación que no ocurre en la realidad puesto que, en un buque normalmente las estaciones de puntería, es decir director óptico o radar, se encuentran en lugares elevados, y los cañones en la cubierta principal, como es el caso del cañón 76/62 mm. Instalado en una corbeta misilera.

Consecuentemente la línea de mira y la línea de tiro no tendrán un origen común, lo que será necesario corregir para que se compensen estos errores de posición (ver figura N°11). El valor de la corrección para cada uno de los ejes mencionados anteriormente está en función a la componente del alcance al blanco en cada uno de los ejes y la distancia paraláctica entre el punto de referencia y la estación de armas analizada.

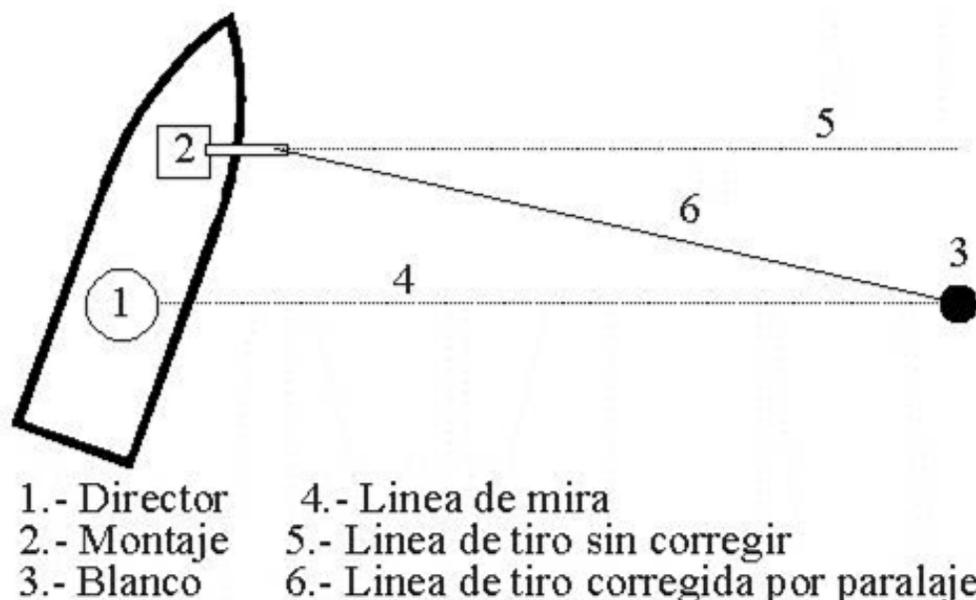


Figura N°11: Correcciones por paralaje (Alarco, 2014)

Cuando se instala un montaje o un director de tiro, esta instalación se hace en forma tal que sus pistas de billas estén lo más paralelas posibles al plano de referencia del buque. Este paralelismo normalmente no se consigue, existiendo pequeños ángulos entre los planos de las pistas de billas del director de tiro (radar), el cañón y el plano de referencia, lo que originaría errores al momento de determinar las

coordenadas del blanco y dar las órdenes al cañón, lo cual será necesario corregir (ver figura N°12).

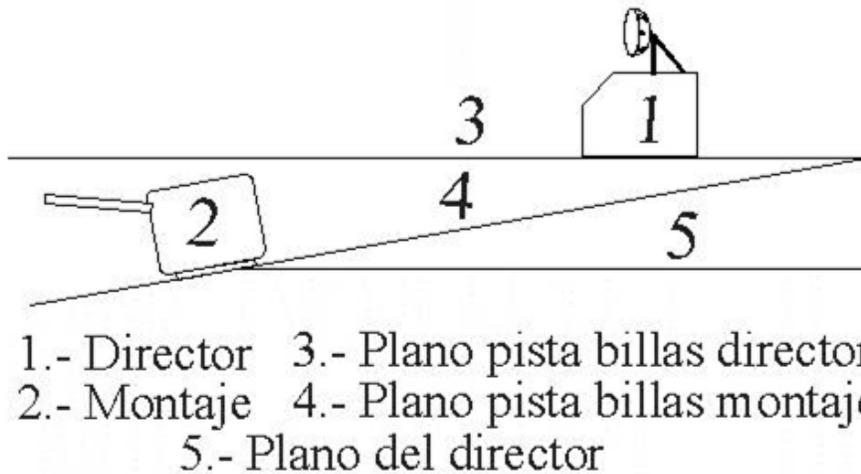


Figura N°12: *Inclinación pista de billas y planos (Alarco, 2014)*

Después de haber analizado las características de la corbeta misilera y de los diversos sistemas a fines al tiro antisuperficie del cañón 76/62 mm., podemos decir que el cañón es ideal para el tipo de buque, por el poco peso y limitada necesidad de espacio (para ser montado en unidades pequeñas), así como por el elevado ritmo de fuego (80 proyectiles por minuto). Asimismo, tiene suficiente maniobrabilidad y rapidez de acción para poder batir blancos de superficie.

Bajo esas consideraciones, para el tiro contra blancos de superficie, la corbeta misilera presenta como problemática lo siguiente:

- Paralaje y estabilización de los sensores y sistemas de control de tiro de armas, producto de la guiñada, cabeceo y rolido del buque cuando se navega.
- Obsolescencia del sistema de control de tiro, especialmente del radar y del calculador (computadora), lo cual dificulta la solución al problema de tiro, y por consiguiente a la ejecución de un disparo eficaz antisuperficie.

1.5 Descripción del problema.

La solución del problema de tiro a bordo de la corbeta misilera debe ser realizada por una computadora, la cual soluciona el problema en base a un modelo matemático predeterminado por el diseñador del equipo para la solución del problema de tiro. En este modelo matemático están consideradas todas las variables del problema de tiro, tanto matemáticas como tácticas para la ejecución del mismo. Sin esta computadora, no se podría realizar el control del cañón para realizar un tiro antisuperficie eficaz, ni realizar las correcciones posteriores al tiro.

Actualmente, las corbetas misileras no poseen una computadora que realice el control del cañón 76/62 mm. de forma efectiva para el tiro contra blanco antisuperficie.

1.6 Conclusiones del capítulo.

El no contar con un sistema de control para el cañón 76/62 mm. ocasionaría que no se realice tiro antisuperficie en forma efectiva contra un blanco. En ese sentido, el desarrollo de un sistema de control de tiro que emplee señales digitales para el cañón antisuperficie 76/62 mm., permitiría mejorar la balística, la actualización del paralaje y cambio de la aplicación de la estabilización para el mismo cañón e inclusive su mantenimiento; principalmente obteniendo los datos del ángulo de ronza y ángulo de elevación requeridos, calculados de forma automática con los datos ingresados al sistema de tiro. Con estas señales se realizaría el control de la posición del cañón 76/62mm. para el tiro antisuperficie a bordo de la corbeta misilera.

2. TÉCNICAS DE CONTROL QUE POSIBILITARÍAN EL CONTROL ADECUADO DEL CAÑÓN ANTISUPERFICIE

2.1 Conceptos previos relacionados a las técnicas de control para la solución del problema.

En ingeniería de control, existen diferentes técnicas cuya aplicación dependerá del tipo de proceso y sistema a controlar. Principalmente deberá verificarse el funcionamiento del sistema, las perturbaciones que actúan, las condiciones de operación, y a su vez si existiese un modelo matemático que represente con aproximación su comportamiento dinámico.

En general, los algoritmos de control son considerados de estructura optimizada, debido a que su estructura depende del sistema particular a controlar. Estos algoritmos requieren una plataforma computacional desarrollada por un experto en control.

Entre las técnicas de control más relevantes que se emplean en aplicaciones industriales, se encuentran las del control óptimo, que se basa en la definición de una función que incluye el error de control y la acción de control y/o sus desviaciones, empleándose el PID con mayor regularidad, y se establece un criterio de optimización sobre dicha función que se ajuste a los objetivos del control.

En el campo del control de procesos, se emplea mucho el control predictivo por modelo (MPC), ya que el sistema utiliza un modelo matemático del proceso para predecir el comportamiento del sistema en el futuro frente a posibles acciones de control a aplicar. Se determina la acción de control óptima a aplicar al sistema para lograr la respuesta deseada del sistema dentro del horizonte de predicción previsto, tanto para la acción de control en el instante presente como en los futuros instantes de muestreo (Badgwell, 1996).

También es conocido el control robusto.

El control robusto consiste en definir una estructura de control que tenga un desempeño acorde a las especificaciones del sistema, independientemente de las perturbaciones a las que esté expuesto. Tal como en MPC, este control incorpora un modelo matemático de la planta, pero en este caso se usa para compensar la dinámica modelable y no modelable de planta. Aunque las acciones de control que pueden lograrse con sistemas de control robusto son más cautelosas que las que resultan de otros sistemas, con un buen ajuste del controlador se pueden lograr sistemas que cumplan ambas prestaciones (Ming, 2002).

Existe también el control adaptivo que es apropiado para sistemas que sean variantes en el tiempo, que suelen incorporar técnicas de identificación de parámetros por mínimos cuadrados u otras técnicas propias del sistema resultante. Una de las más conocidas dentro de este tipo de control es el “control adaptivo por modelo de referencia, es decir un modelo con una dinámica como la que gustaría que tenga el sistema” (Rivera, 2002).

Por otro lado, en el campo de la robótica, la teoría de manipuladores que estudia la cinemática y la dinámica de robots estáticos es fácilmente aplicable a los móviles cuando cuentan con sistemas que lo movilicen. En ese sentido, “un manipulador puede ser reprogramable y multifuncional para realizar diversos movimientos y ejecutar varias aplicaciones; así como también ejecuta acciones en forma automática, debido a su estructura mecánica y por contar con un sistema de control programable” (Arnáez, 2015).

Los manipuladores tienen complejas dinámicas no lineales que hacen muy difícil el diseño de sus controladores. Por otro lado, la dinámica del robot está dentro de la clase de la dinámica de los sistemas de Lagrange-Euler, la cual se basa en el balance de energía; y permite describir la dinámica del robot considerándolo como una caja negra, teniendo en cuenta la energía almacenada en términos de energía cinética y potencial. Los robots tienen

propiedades físicas modelables y, por ende, es más aplicable la tarea de control (Arnáez, 2015).

En el ámbito militar, los robots son empleados en diversas aplicaciones. En particular para este trabajo de investigación, el sistema de puntería haría las veces de órganos terminales que buscan alcanzar el objetivo que es el blanco de superficie.

La tarea de control es diseñar un controlador para cada junta del robot como un sistema SISO. Es decir, el manipulador dinámico es simplificado a un sistema de segundo orden lineal acoplado. Se ha encontrado que en la realidad la dinámica de manipuladores incluye no sólo efectos acoplados sino también otros términos no lineales como la fricción y la gravedad, que explican las falencias de los métodos de diseño de control SISO en muchos casos.

Se han implementado muchas estrategias para dar solución a los problemas relacionados a mejorar el rendimiento de controladores en el seguimiento de trayectorias, “proponiendo una gran variedad de algoritmos y métodos convencionales de control en aplicaciones de robótica y áreas relacionadas, entre los cuales se destacan el controlador Proporcional Derivativo (PD) mediante el Torque Computarizado (TC)” (Valencia et al., 2009).

2.2 Análisis de las técnicas de control que posibilitarían el control adecuado del cañón antiperficie 76/62 mm.

Como se explicó en el capítulo I, el cañón de artillería del buque, es un sistema mecánico-eléctrico que responde a órdenes enviadas por un calculador o computador. Realiza dos movimientos angulares, elevación y deflexión, es decir cuenta con dos grados de libertad (DOF) para la caña del montaje. Se puede comparar a un robot articular esférico (ver figura N°13), pudiéndose calcular los movimientos con la cinemática para robots.

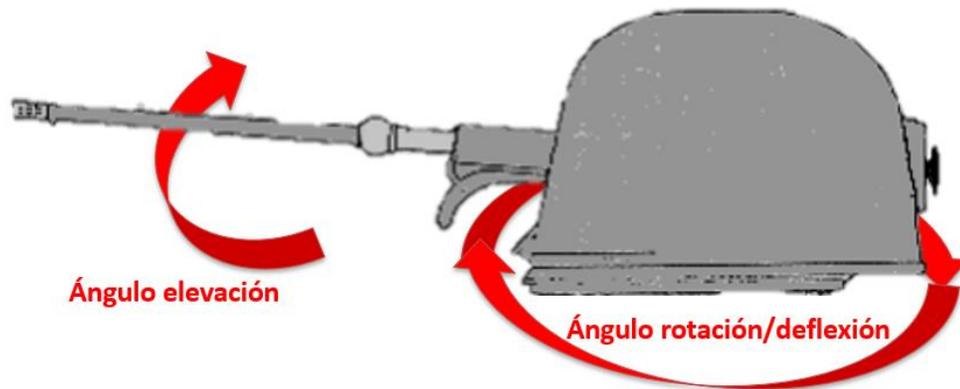


Figura N°13: Cañón 76/62 mm con 2 DOF (Imagen fuente propia)

La dinámica se ocupa de la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo debido al movimiento que éstas generan. En el caso del modelo dinámico del cañón analizado como un robot, se trataría de conocer la relación entre el movimiento de la ronzca y elevación, y las fuerzas que se originan; para posteriormente relacionarlas matemáticamente con las variables articulares y sus derivadas (velocidad y aceleración), las fuerzas y los momentos aplicados a las articulaciones y las características propias del cañón (longitud, masa e inercias).

El modelo para el caso de robots de dos grados de libertad, como el cañón 76/62 mm. no es muy complejo, pero es necesario el empleo de métodos computacionales para resolverlo.

En ese sentido, para realizar el control del cañón como un robot, es necesario modelarlo como un sistema MIMO, teniendo en cuenta los vectores de posición, velocidad y aceleración de sus articulaciones; con aplicaciones matemáticas matriciales y vectoriales, teoría de robótica y programación. El controlador en este caso, enviaría un vector de señales de control, la cual sería la ley de control, para accionar los motores articulares, con el respectivo torque.

Dado que es un sistema no lineal, se emplearía la técnica de control de torque computarizado (CTC), que usa el control de linealización por retroalimentación, un control PD (proporcional-derivativo) como una herramienta sencilla para controlar manipuladores de robots.

La técnica CTC (Spong et al., 1989) determina matemáticamente el torque que demanda cada articulación para realizar una trayectoria. Cuenta con un lazo de realimentación interno (feedforward loop) para eliminar los términos no lineales del sistema, y un lazo de realimentación externo (feedback loop) para el seguimiento de la señal de entrada (ver figura N°14).

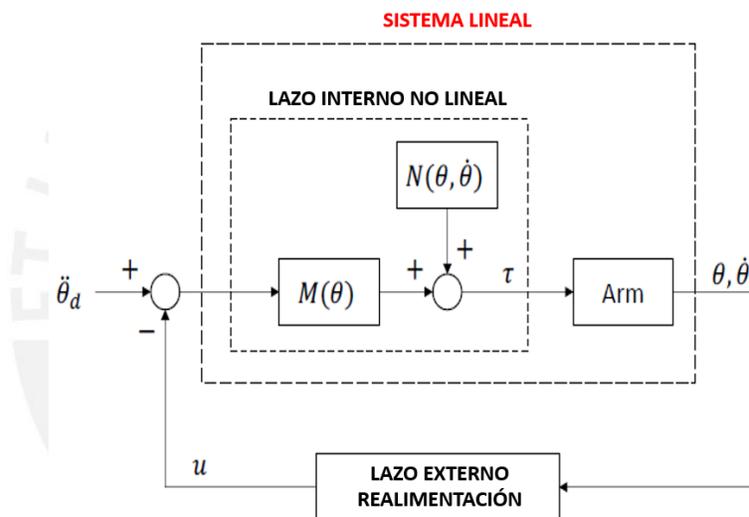


Figura N°14: Técnica de control de torque computarizado (CTC) (Sanasin Park, 2018)

Aplicando la derivación del lazo interno de realimentación (Sanasin Park, 2018), de acuerdo a la dinámica del robot, tenemos el modelo matemático ideal sin fricciones ni perturbaciones:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau$$

Donde M es la matriz de inercias.

V es el vector de fuerzas centrípetas y de coriolis.

G el vector gravedad.

τ el vector de torque requerido para cada articulación del robot.

Despejando, por conveniencia tenemos:

$$\begin{aligned}V(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) &= \mathbf{N}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}): \\ \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{N}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) &= \boldsymbol{\tau}\end{aligned}$$

Se define el error de seguimiento:

$$\mathbf{e}(t) = \boldsymbol{\theta}_d(t) - \boldsymbol{\theta}(t)$$

Donde, $\boldsymbol{\theta}_d(t)$ es la trayectoria deseada.

Aplicando dos veces derivada al error:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{e}} &= \dot{\boldsymbol{\theta}}_d - \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ \ddot{\mathbf{e}} &= \ddot{\boldsymbol{\theta}}_d - \ddot{\boldsymbol{\theta}}\end{aligned}$$

Para eliminar el término no lineal y el seguimiento de la trayectoria deseada, se define la ley de control de torque computarizado:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\ddot{\boldsymbol{\theta}}_d - \mathbf{u}) + \mathbf{N}$$

Donde \mathbf{u} es la señal de entrada del lazo de control externo de realimentación.

En ese sentido, con la finalidad de comprobar si la ley de control elegida es apropiada al robot, se sustituye $\boldsymbol{\tau}$ en el modelo matemático ideal de la dinámica del robot. Tenemos que:

$$\begin{aligned}\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{N} &= \mathbf{M}(\ddot{\boldsymbol{\theta}}_d - \mathbf{u}) + \mathbf{N} \\ \mathbf{M}(\ddot{\boldsymbol{\theta}}_d - \ddot{\boldsymbol{\theta}}) &= \mathbf{M}\mathbf{u} \\ \therefore \ddot{\mathbf{e}} &= \mathbf{u}\end{aligned}$$

Por consiguiente, si se selecciona una señal de control \mathbf{u} que establezca $\ddot{\mathbf{e}} = \mathbf{u}$, entonces el error \mathbf{e} será cero.

En el *controlador PD* para el lazo externo (ver figura N°15), una forma de seleccionar la señal de entrada \mathbf{u} del lazo externo de realimentación es la realimentación proporcional derivativo *PD*:

$$\mathbf{u} = -k_d \dot{\mathbf{e}} - k_p \mathbf{e}$$

Entonces, la ley de control se transforma en:

$$\tau = M(\ddot{\theta}_d + k_d \dot{e} + k_p e) + N$$

Donde k_d es una matriz diagonal positiva que representa las constantes derivativas; y k_p es una matriz diagonal positiva que representa las constantes proporcionales.

La dinámica del error de lazo cerrado será:

$$\ddot{e} + k_d \dot{e} + k_p e = 0$$

De acuerdo Arnáez, 2015, en la última expresión, se produce un error dinámico de seguimiento, el cual es estable si la matriz k_d cuenta con valores grandes, y la matriz k_p es matemáticamente definida positiva. Lo ideal es seleccionar matrices diagonales, a fin de asegurar la estabilidad del sistema.

En ese sentido, el error del sistema es asintóticamente estable si k_d y k_p son positivos.

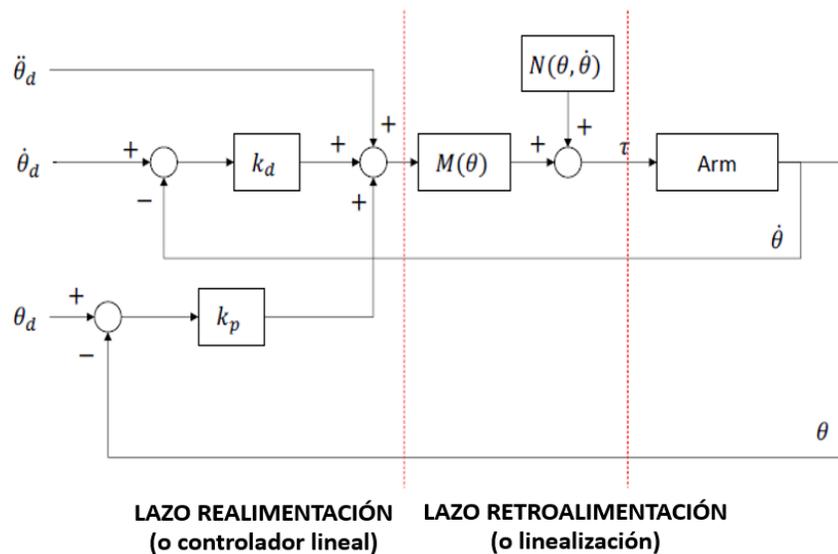


Figura N°15: Diagrama de bloques del PD Control de Torque Computado (Sanasin Park, 2018)

2.3 Objetivos a alcanzar.

a. Objetivo General

Diseño del control que permita determinar la posición de un cañón para tiro antiperficie abordo de una corbeta misilera.

b. Objetivos Específicos

Para poder alcanzar el objetivo general planteado en este trabajo de investigación, es necesario realizar los siguientes trabajos de investigación y desarrollo:

- a. Análisis de las ecuaciones al problema de tiro y modelado.
- b. Estudio de técnicas de control y selección de mejor alternativa.
- c. Solución matricial para la estabilización y paralaje.
- d. Validación del modelo obtenido.
- e. Diseño del controlador.
- f. Pruebas de seguimiento del cañón a la orden del controlador.



3. CONTROL DEL MOVIMIENTO DEL CAÑÓN ANTISUPERFICIE

3.1 Análisis de las ecuaciones al problema de tiro y modelado del cálculo de tiro del cañón Oto Melara 76/62 mm.

A fin de modelar las ecuaciones para el cálculo del problema de tiro, se evaluaron las fórmulas existentes en la tabla de tiro del cañón Oto Melara 76/62 mm. para analizarlas e interactuar con los datos propios de la tabla incluidas en el Anexo A, con la finalidad de que a través de la plataforma computacional se pueda dar la solución y contar con los ángulos de elevación y de ronza para el cañón en mención, a la distancia y marcación verdadera solicitada.

En un principio se debe cargar en la memoria del programa a desarrollar, la tabla de tiro del anexo A, divididos en las siguientes columnas:

- Columna 1: Alcance (metros)
- Columna 2: Ángulo de tiro (minutos)
- Columna 3: Variación del ángulo de tiro por 100 metros más de alcance (minutos).
- Columna 4: Ángulo de caída (grados)
- Columna 5: Ángulo de caída (complemento de minutos)
- Columna 6: Ángulo de caída (minutos ($C4*60+C5$))
- Columna 7: Duración de la trayectoria (segundos)
- Columna 8: Velocidad residual (metros/segundos)
- Columna 9: Deriva (metros)
- Columna 10: Zona batida para un blanco de 10 metros de altura (metros).
- Columna 11: Ordenada del vértice (metros).
- Columna 12: Aumento de 10 m/seg. en la velocidad inicial (sin unidades).
- Columna 13: Disminución de 100 gramos de peso en el proyectil (sin unidades).
- Columna 14: Disminución del 10% en la densidad del aire (sin unidades).

- Columna 15: Disminución de 5°C en la temperatura del aire (sin unidades).
- Columna 16: Componente en distancia del viento (metros).
- Columna 17: Componente en distancia del buque propio (metros).
- Columna 18: Componente en distancia del blanco (metros).
- Columna 19: Componente en deflexión del viento (metros).
- Columna 20: Componente en deflexión del buque propio (metros).
- Columna 21: Componente en deflexión del blanco (metros).
- Columna 22: Variación de la altura de impacto por una variación de alza de 100 metros (metros).

Posteriormente se debe ingresar los datos de peso del proyectil en kg., la temperatura atmosférica (TA) en grados centígrados °C, la presión atmosférica (PA) en *pulg.Hg*, y las correcciones arbitrarias en alcance y deflexión en metros.

Asimismo, para determinar la densidad del aire (DA) en la zona del disparo, se ingresa la siguiente fórmula:

$$DA = PA * 3.2596 - (TA * 1.8 + 32) * 0.2219 + 17.1806$$

Para el cálculo de la velocidad inicial en metros por segundo, (V_0) se ingresa el dato determinado por el Jefe de Armamento del buque, en base a su experiencia en el arma.

Asimismo, se realiza la asignación del coeficiente de densidad del proyectil de acuerdo a la página 7 de la tabla de tiro del cañón Oto Melara 76/62 mm.

Seguidamente se calcula los componentes cinemáticos, para lo cual por interfase con el radar de navegación y control de tiro, se deben tener la distancia, marcación y elevación del blanco. Para efectos de la simulación en el programa a desarrollar en el presente trabajo, se ingresarán los datos indicados manualmente, en unidades radianes para los cálculos matemáticos, y la validación correspondiente del modelo.

En ese sentido, para convertir en radianes, se realiza la conversión de unidades náuticas a unidades matemáticas, considerando de 0 a 360 grados.

Debido a que se trabaja en los ejes x , y , z , se realiza la conversión de coordenadas esféricas a coordenadas cartesianas:

$$x = D * \text{Cos}(E) * \text{Cos}(Df)$$

$$y = D * \text{Cos}(E) * \text{Sen}(Df)$$

$$z = D * \text{Sen}(E)$$

Donde:

D = distancia del origen al punto

E = ángulo de elevación

Df = ángulo de deflexión

x = componente de coordenadas cartesianas X

y = componente de coordenadas cartesianas Y

z = componente de coordenadas cartesianas Z

Para efectos de simulación, se ingresan los datos para la estabilización, simulados de la interfase con la señal de girocompás (cabeceo, rolido y guiñada). Con esos datos, se realiza la rotación de un sistema cartesiano inicial xr - yr - zr a un sistema xe - ye - ze ; considerándose en grados sexagesimales las rotaciones siguientes:

ca = cabeceo; giro alrededor del eje X.

ro = rolido; giro alrededor del eje Y.

gi = guiñada; giro alrededor del eje Z.

Para el cálculo balístico se pasa del sistema cartesiano a esférico estabilizado, con la siguiente forma:

$$E = \tan^{-1}\left(\frac{z}{\sqrt{(x^2 + y^2)}}\right)$$

$$Df = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right)$$

$$D = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$$

Donde:

x = componente de coordenadas cartesianas X

y = componente de coordenadas cartesianas Y

z = componente de coordenadas cartesianas Z

E = ángulo de elevación

D = distancia del origen al punto

Df = ángulo de deflexión

Posteriormente se vuelve a cambiar de coordenadas matemáticas a coordenadas náuticas para poder considerar los datos del rumbo propio del buque tirador y del buque blanco, así como la dirección del viento. Estos datos se simulan interfazados del radar, del girocompás y del anemómetro; para después descomponerlos en valores dentro de los ejes x , y e z tanto del buque propio, como del blanco y del viento.

Con todos estos datos, se inicia la interacción con los datos memorizados de la tabla de tiro, calculando la entrada a la fila correspondiente de la tabla, para ubicar el dato en las filas de la tabla grabada, empleándose la siguiente fórmula:

```
fila = floor((D+100)/100);
```

Después se calcula el alza de la caña en elevación, de acuerdo a la tabla tiro del cañón 76/62mm, tomando los datos para la velocidad inicial del proyectil, para el peso del proyectil con espoleta, para la densidad balística, el tipo de proyectil, la

temperatura del aire, los componentes del viento, blanco y cañón, y la corrección arbitraria. Todos estos datos se suman para después añadirse al dato de alza en elevación de la columna 2 de la tabla de tiro.

En el cálculo del alza en deflexión, se emplea la columna 9 de la tabla de tiro para determinar la deriva del proyectil, y posteriormente la componente del viento, del cañón y del blanco. Al final se determina la corrección arbitraria en deflexión para sumarse a todos los datos hallados y obtener el dato del alza en deflexión.

3.2. Solución matricial para la estabilización y paralaje.

Considerando lo descrito en el párrafo 1.4 del capítulo I, el problema del paralaje en el sistema de armas de la corbeta misilera, se encuentra principalmente en la conversión de los datos de posición relativa del blanco de superficie con respecto al radar de control de tiro y del mismo blanco de superficie hacia el cañón 76/62 mm.

En la corbeta misilera el cañón y el radar se encuentran sobre la misma línea longitudinal, a diferente altura y distancia.

En ese sentido, considerando como principio teórico el método de transformación de sistemas de coordenadas para cinemática de robots (Cortés, 2008), llamado método de identificación de parámetros de Denavit-Hartenberg (D-H), y tomando como referencia un trabajo realizado en la Marina de Guerra del Perú por el Contralmirante Enrique Arnáez Braschi en el año 2001, se establecieron cinco sistemas de referencia, ubicando el origen en el cañón 76/62 mm. y el final sobre el blanco de superficie (ver figura N°16).

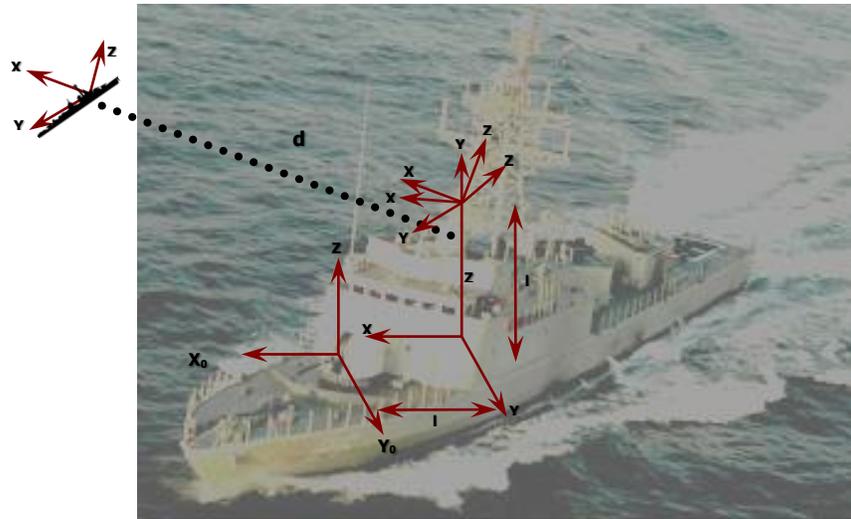


Figura N°16: Aplicación de referencia método Denavit-Hartenberg (Arnáez, 2001)

Con estos sistemas de referencia y aplicando el método Denavit-Hartenberg (D-H) (Alonzo et al., 2014), se calculan las Matrices 'A' de transformación para cada sistema de referencia y con estas se calcula la matriz Total de Transformación T (Arnáez, 2015), siendo las variables y constantes:

Variables:

- d = Distancia al blanco
- θ_r = Ángulo de ronza
- θ_e = Ángulo de elevación

Constantes:

- lh = Distancia horizontal desde el cañón 76/62 mm. hasta la vertical del sistema de control de tiro
- lv = Distancia vertical entre el cañón 76/62 mm. hasta la vertical del sistema de control de tiro

En los elementos del (1,4) al (3,4), se encuentran las transformaciones x, y, z del blanco de superficie sobre el cañón.

Una vez asignados los ejes de rotación, se construye una tabla de parámetros de Denavit-Hartenberg, con la forma de obtener estos parámetros (Paul, 1981):

- i , es el número de eslabón del brazo del cual se están obteniendo los parámetros.
- α_n es la rotación alrededor del eje x_n .
- a_n es la traslación a lo largo de $x_{n-1}=x_n$.
- θ_n ($^\circ$) es la rotación alrededor del eje z_{n-1} .
- d_n es la traslación a lo largo del eje z_{n-1} .

Empleando la convención de D-H, se determina la Tabla N°1.

Tabla N°1. - Parámetros por convención Denavit-Hatenberg

Sistema \ Parámetros	θ_i	α_i	d_i	a_i
1	0	0	0	l_h
2	θ_r	$\pi/2$	l_v	0
3	θ_e	$3\pi/2$	0	0
4	0	0	0	D

Después de completar la tabla, se utilizan los parámetros para encontrar las matrices de transformación por cada grado de libertad.

El modelo cinemático completo se obtiene al multiplicar todas las matrices de transformación. Mediante MATLAB, se calcula las matrices de transformación A_i :

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_h \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & 0 & \sin(\theta_r) & 0 \\ \sin(\theta_r) & 0 & \cos(\theta_r) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_v \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & 0 & -\sin(\theta_e) & 0 \\ \sin(\theta_e) & 0 & -\cos(\theta_e) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Posteriormente, con las matrices, se determina matriz Total de Transformación T (T_4^0):

$$T_4^0 = A_1 A_2 A_3 A_4$$

$$T_4^0 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r)\cos(\theta_e) & \sin(\theta_r) & -\cos(\theta_r)\sin(\theta_e) & d\cos(\theta_r)\cos(\theta_e) + l_h \\ -\sin(\theta_r)\cos(\theta_e) & -\cos(\theta_r) & \sin(\theta_r)\sin(\theta_e) & -d\sin(\theta_r)\cos(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) & 0 & -\cos(\theta_e) & d\sin(\theta_e) + l_v \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las coordenadas del blanco con respecto al origen, es decir el cañón 76/62 mm., están en los primeros tres elementos de la última columna de esta matriz de transformación T , es decir:

$$P_4^0 = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d \cos(\theta_r) \cos(\theta_e) + l_h \\ -d \sin(\theta_r) \cos(\theta_e) \\ d \sin(\theta_e) + l_v \end{bmatrix}$$

Por otro lado, para la determinar la solución al problema de estabilización del cañón 76/62 mm., producto de los movimientos por el efectos del mar y el viento; se aplica la teoría de matrices de rotación básicas de Jaramillo, 2005.

Suponiendo dos sistemas de coordenadas de orígenes coincidentes, $ouvw$ y $oxyz$, y asumiendo que el sistema $ouvw$ se mueve rotacionalmente con respecto al sistema de referencia $oxyz$, se define una matriz de rotación como un operador que expresa la diferencia de orientación entre el sistema de coordenadas en movimiento ($ouvw$) y el sistema de referencia fijo ($oxyz$)” (Jaramillo, 2005).

En ese sentido, indica por simplicidad ilustrativa.

Se supone la presencia de un cuerpo sólido ligado por uno de sus vértices al sistema $ouvw$ en movimiento, es decir, se mueve con él (ver figura 17). Representando cualquier punto del cuerpo como un vector p respecto del sistema $ouvw$, se define entonces la matriz de rotación como aquella que opera sobre p y transforma sus coordenadas expresadas en el sistema de coordenadas rotado $ouvw$ en el sistema de coordenadas de referencia $oxyz$ ” (Jaramillo, 2005).

Por consiguiente, se debe encontrar una matriz que transforme las coordenadas de un punto cualquiera p , ligado a un sistema de coordenadas en movimiento $ouvw$, a las coordenadas expresadas con respecto al sistema de coordenadas de $oxyz$, después de que el sistema de coordenadas $ouvw$ ha sido girado.

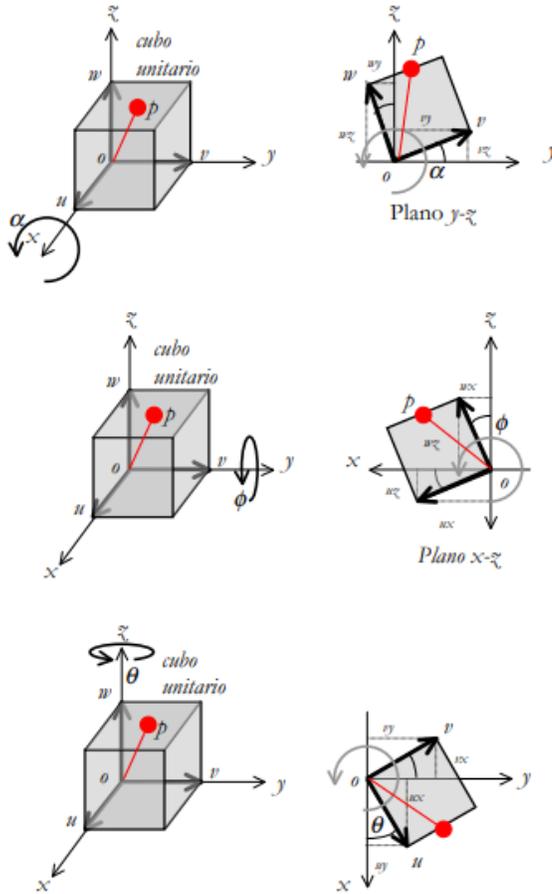


Figura N°17: Rotaciones básicas en los ejes x, y, z
(Jaramillo, 2005)

Empleando esta teoría de rotaciones, a través del trabajo realizado en la Marina de Guerra del Perú por el Contralmirante Enrique Arnáez Braschi en el año 2001, se consideran como referencia los ángulos que se originan con los movimientos del buque en cabeceo, rolido y guiñada, tal como se observan en la figura N° 17:

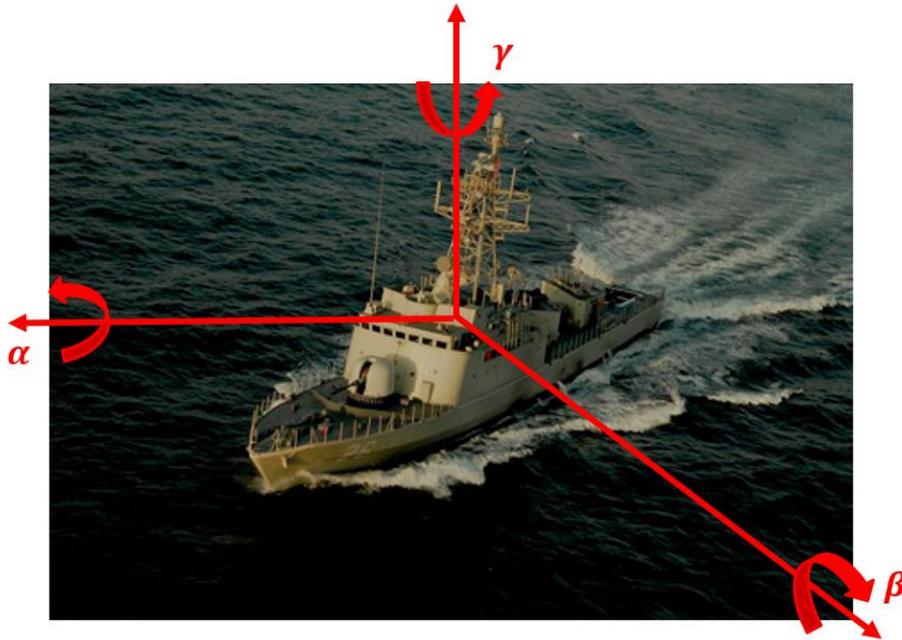


Figura N°18: Ángulos referencia para estabilización
(Arnáez, 2001)

Donde:

α es el ángulo del rolido

β es el ángulo de cabeceo

γ es el ángulo de guiñada.

Con ayuda del Matlab, se determina la siguiente matriz A:

$$A = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}$$

Para determinar la solución al problema de paralaje en el cañón 76/62 mm., se considera que la variación en elevación es despreciable, mientras que en deflexión se debe convertir las coordenadas cartesianas a datos náuticos (grados, min, seg), luego de haber hallado la balística del párrafo anterior (Arnáez, 2001).

Posteriormente se pasa de unidades matemáticas o esféricas a coordenadas cartesianas en los ejes x,y,z para la solución de los problemas de paralaje y de estabilización, donde:

$$r = r * \pi / 180$$

$$c = c * \pi / 180$$

$$g = g * \pi / 180$$

r = rolido; giro alrededor del eje Y.

c = cabeceo; giro alrededor del eje X.

g = guiñada; giro alrededor del eje Z.

En ese sentido, con ayuda del Matlab, la matriz A de rotación (*Arot*) de 3x3 sería:

```
Arot = [   cos(g)*cos(r)   -sin(g)*cos(c)+cos(g)*sin(r)*sin(c)
          sin(g)*sin(c)+cos(g)*sin(r)*cos(c);

          sin(g)*cos(r)   cos(g)*cos(c)+sin(g)*sin(r)*sin(c)
          -cos(g)*sin(c)+sin(g)*sin(r)*cos(c);

          -sin(r)         cos(r)*sin(c)
          cos(r)*cos(c)                                     ];
```

Después, realizando la conversión de grados sexagesimales a unidades náuticas, se determina el ángulo en deflexión y el ángulo en elevación necesario para la caña a la distancia seleccionada al blanco, estabilizado y con las correcciones de paralaje.

3.3. Validación del modelo obtenido.

De acuerdo a lo descrito en el párrafo 3.1 y 3.2, se desarrollaron los algoritmos dispuestos para solucionar el problema del cálculo de tiro, con las correcciones en paralaje y por el problema de estabilización del cañón 76/62 mm. y del radar; ingresando la marcación y distancia del blanco de superficie, a fin de determinar los ángulos de ronza y de elevación necesarios para realizar el tiro antisuperficie.

En ese sentido, de acuerdo a las características del cañón y con los datos predispuestos de la tabla de tiro, se cuenta con distancias desde 0 a 15,000 metros para seleccionar.

A efectos de realizar una validación de los cálculos a los algoritmos y modelo realizado de la solución al problema de tiro, se ingresan los siguientes datos como ejemplo:

Peso = 6.35; peso del proyectil espoletado en KG
Temp = 17; temperatura atmosférica en °C del área donde se realiza tiro
PrAt = 29; presión atmosférica en pulg.Hg del área donde se realiza tiro

CoArA = 0; corrección arbitraria del cañón en alcance en metros
CoArD = 0; corrección arbitraria del cañón en deflexión en metros

Asimismo, para efectos de validación y de acuerdo a la información simulada del radar de navegación, se ha considerado la detección y clasificación de un contacto de superficie como un blanco para realizar tiro. Los datos proporcionados son:

Dist = 11000; Distancia al buque blanco en metros
Marc = 90; marcación al buque blanco en grados sexagesimales
Elev = 0; elevación al blanco de superficie (se considera cero por ser un buque al ras de la superficie)

Por otro lado, para simular los datos de estabilización, entregados por la señal de girocompás, considerando que el buque cuenta con un movimiento ligero de las olas del mar, se ingresan los siguientes datos:

ca = 2; cabeceo
ro = 1; Rolido
gi = 2; Guiñada

Posteriormente se ingresan los datos que se simulan interfazados del radar, girocompás y anemómetro:

RbV = 45; dirección del viento verdadero en grados sexagesimales
VvV = 18; intensidad del Viento verdadero en nudos
RbC = 180; rumbo propio en grados sexagesimales
VvC = 10; velocidad propia en nudos
RbB = 0; rumbo del buque blanco en grados sexagesimales
VvB = 0; velocidad del buque blanco en nudos

Con todos los datos anteriormente descritos ingresados al computador, se obtiene el siguiente ángulo de ronza y elevación:

$$\text{DeflbCanPxSest} = 89.3107 \text{ (ángulo de ronza del cañón)}$$

$$\text{ElevbCanPxSest} = 15.0329 \text{ (ángulo de elevación del cañón)}$$

Como se observa, los datos del blanco y del buque propio, así como también los parámetros de la tabla de tiro son ingresados al programa calculador descrito en los párrafos anteriores, donde no existe una realimentación en lazo cerrado para mantener el error a cero a tiempo mínimo, especialmente cuando el ejercicio de tiro lo amerite; existiendo la posibilidad que se produzcan errores en las interfaces con los diferentes equipos, así como también pérdidas de señales producto de obsolescencia técnica; ameritando un control en el sistema desarrollado.

3.4. Diseño del controlador.

De acuerdo a lo descrito en el párrafo 2.2, se ha seleccionado aplicar un controlador de torque computarizado, debido a que se considera para el presente trabajo de investigación que el cañón 76/62 mm. Se comporta como un robot con dos grados de libertad, es decir un movimiento en elevación y otro en deflexión.

El controlador seleccionado, permitirá determinar el torque necesario para corregir los errores que puedan existir y en mínimo tiempo llegar a los ángulos de ronza y de elevación requeridos para que la caña del montaje 76/62 mm. se posicione y esté lista para ejecutar un tiro antisuperficie a distancia seleccionada.

Tomando como referencia el controlador de torque computarizado para el brazo robot (Arnáez, 2015), se adaptaron los algoritmos para el sistema del cañón Oto Melara 76/62 mm. para condiciones iniciales de tiempo de cero a diez segundos, con un diferencial de tiempo de 0.001, y considerando como constantes de la

trayectoria una señal senoidal de entrada con amplitud predeterminada y periodo 2π .

Por otro lado, para las constantes del sistema robot se consideran las cantidades de masas y longitudes reales del montaje 76/62 mm. en las unidades de metros y toneladas descritas en el capítulo 1.

Los parámetros del controlador, es decir los factores proporcional y derivativo, son afinados en función a la respuesta del sistema controlado.

Definiendo la trayectoria y los errores de seguimiento, y en función a la señal deseada de posición, tenemos el siguiente programa:

```
%condiciones iniciales
x=[0 0 0 0]';
k=1;

%constantes del sistema
m1=700; m2=170; %Masa del cañón 76/62 mm x 10 Kg.
a1=2/2; %Longitud del brazo del cañón 76/62 mm en metros
a2=1/2; %Longitud media del brazo del cañón 76/62 mm en metros
g=9.8; %Aceleración de la gravedad en m/s2

% Vector input
t0=0;
dt=0.001;
tf=10;
a = size(t0:dt:tf);
b= a(2);
b1 = floor(b/1);
b2 = b-b1;
xi= [(pi/2)*ones(1,b1) (pi/4)*ones(1,b2) ; (pi/6)*ones(1,b1)
(pi/3)*ones(1,b2)];
xi = xi';
ki = 0;

for t=t0:dt:tf
    ki=ki+1;
    if ki==1
        xip(ki,:)=[0; 0];
        xipp(ki,:)=[0; 0];
    else
        if ki==2
            xipp(ki,:)=[0; 0];
        else
            xip(ki,:) = [(xi(ki-1,1)-xi(ki,1))/dt; (xi(ki-1,2)-xi(ki,2))/dt];
        end
    end
end
```

```

        xipp(ki,:) = [(xip(ki-1,1)-xip(ki,1))/dt; (xip(ki-1,2)-
xip(ki,2))/dt];
    end
end
end

xi = xi';
ki = 0;
se=180/3.141592;
for t=t0:dt:tf
    T(k,1)=t;
    X1(k,1)=x(1);
    X2(k,1)=x(2);
    X3(k,1)=x(3);
    X4(k,1)=x(4);
    ki=ki+1;

    qd = xi(:,ki);
    qdp= xip(ki,:)';
    qdpp= xipp(ki,:)';
    QD(k,1:2)=qd';
    QDP(k,1:2)=qdp';

    %errores de seguimiento
    e=qd-[x(1) x(2)]';
    ep=qdp-[x(3) x(4)]';
    E(k,1:2)=e';
    EP(k,1:2)=ep';

```

Posteriormente, recordando lo descrito en el párrafo 2.2:

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\tau}$$

Donde \mathbf{M} es la matriz de inercias.

\mathbf{V} es la matriz de fuerzas centrípetas y de coriolis.

\mathbf{G} el vector gravedad.

$\boldsymbol{\tau}$ el torque requerido para cada articulación del robot.

A continuación, se determina el cálculo de las matrices del manipulador; es decir la matriz de inercias, la matriz de fuerza centrípetas y de coriolis y el vector de gravedad; definiendo lo siguiente:

```

%matriz de inercias M
M11=m1*a1^2*(cos(x(2)))^2;
M12=0;
M22=m1*a1^2;
M= [M11 M12;M12 M22];

```

```

%inversa de M(q)
MI=inv(M);

%matriz de fuerzas centrípetas y de coriolis
N1=-m1*a1^2*sin(2*x(2))*x(3)*x(4);
N2=-1/2*m1*a1^2*sin(2*x(2))*x(3)^2;
N=[N1;N2];

%vector de gravedad
G1=0;
G2=m1*g*a1*cos(x(2));
G=[G1;G2];

```

Para definir la señal de control de torque computado τ , proporcional y derivativo, determinamos lo siguiente:

```

%señal de control torque computado (tau)
s1=qdpp(1)+kv*ep(1)+kp*e(1);
s2=qdpp(2)+kv*ep(2)+kp*e(2);
s=[s1 s2];
tau=M*s+N+G;

```

Pasando a ecuación de espacio estado e integrando para hallar la posición, tenemos:

```

xp=[x(3) x(4) MI*(-N-G+tau)];

```

```

%integración
x= x + xp*dt;
k=k+1;

```

Considerando el controlador sin los pesos de los parámetros proporcional y derivativo ($k_p=k_d=0$), tenemos el sistema en lazo abierto, el cual presenta la siguiente respuesta:

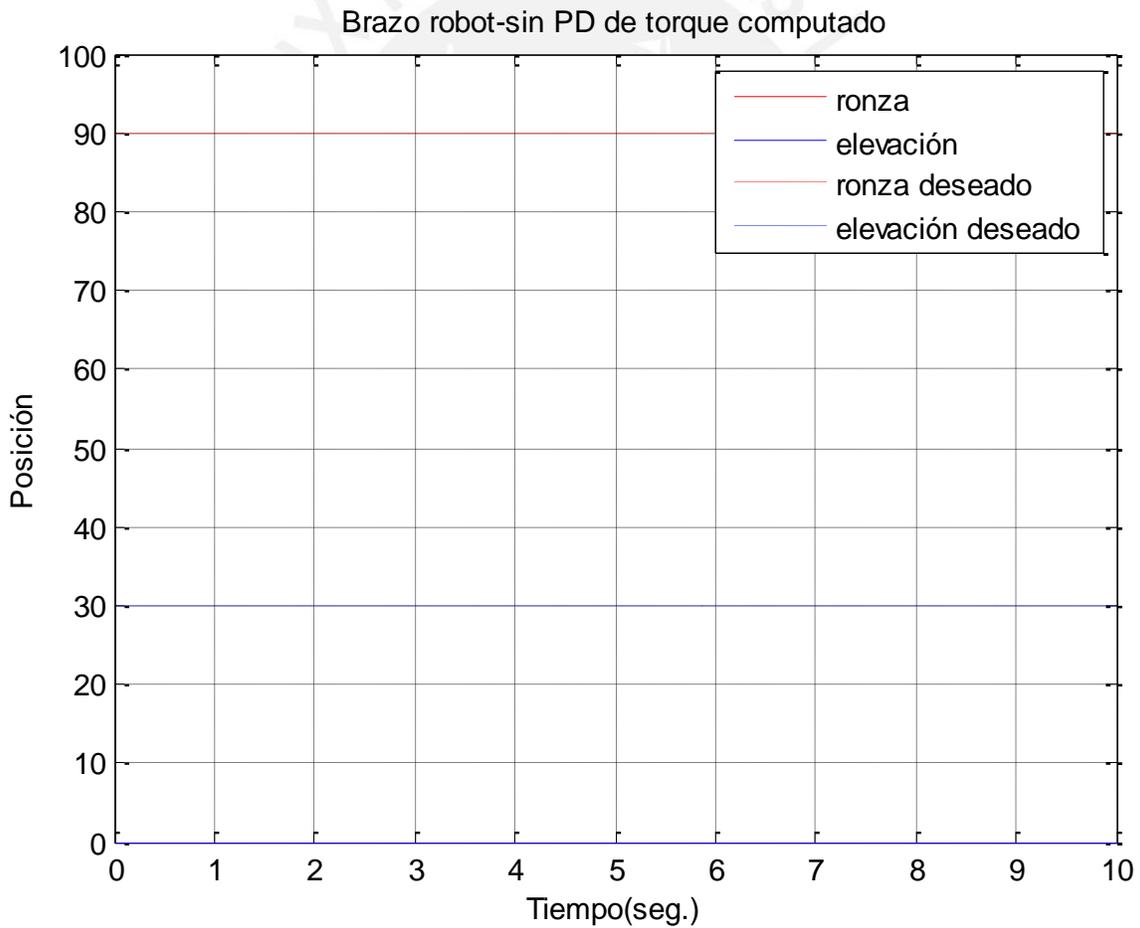
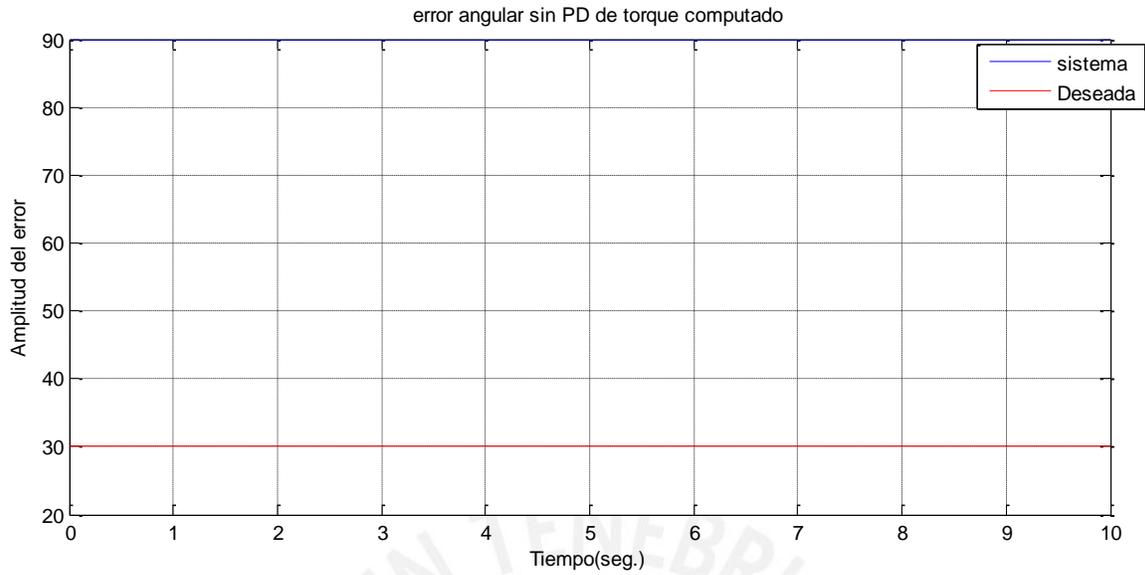


Figura N°19: Error angular en radianes de la caña del montaje 76/62 mm. sin controlador y respuesta a la señal de deseada

Podemos observar en la figura 19 que el sistema no realiza el control y seguimiento de la señal deseada; al no haberse considerado los pesos predeterminados en los parámetros del controlador PD, tanto en lo proporcional como en lo derivativo.



4. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Pruebas de simulación.

Para efectos de validar el modelo obtenido del controlador diseñado, se considera como factor proporcional 30 y derivativo 20 ($k_p=30$; $k_v=20$).

Considerando lo descrito en el párrafo 3.3 del presente trabajo, se ingresaron los siguientes datos de manera de ejemplo:

Tabla N°2.- Datos balísticos y atmosféricos para ejecución tiro antiperficie con un buque blanco parado y buque en movimiento

Temperatura Atmosférica	Presión Atmosférica	Distancia al blanco	Marcación al blanco	Rumbo propio	Velocidad propia
17 °C	29 pulg. Hg	11,000 metros	090°	180°	10 nudos

Rumbo blanco	Velocidad blanco	Cabeceo	Rolido	Guiñada	Dirección viento	Intensidad viento
000°	0 nudos	2	1	2	045°	18 nudos

Con estos datos de la tabla N°2, y teniendo como la señal de referencia el escalón, tenemos como ángulos de posición para la caña 76/62 mm:

Ángulo deseado en deflexión = 89.3107

Ángulo deseado en elevación = 15.0329

Estas son las señales de referencia expresados en grados sexagesimales de posición para la caña 76/62 mm., para los datos balísticos y atmosféricos indicados.

Al correr el programa, tenemos como respuesta del sistema en deflexión línea azul y en elevación en línea roja la siguiente:

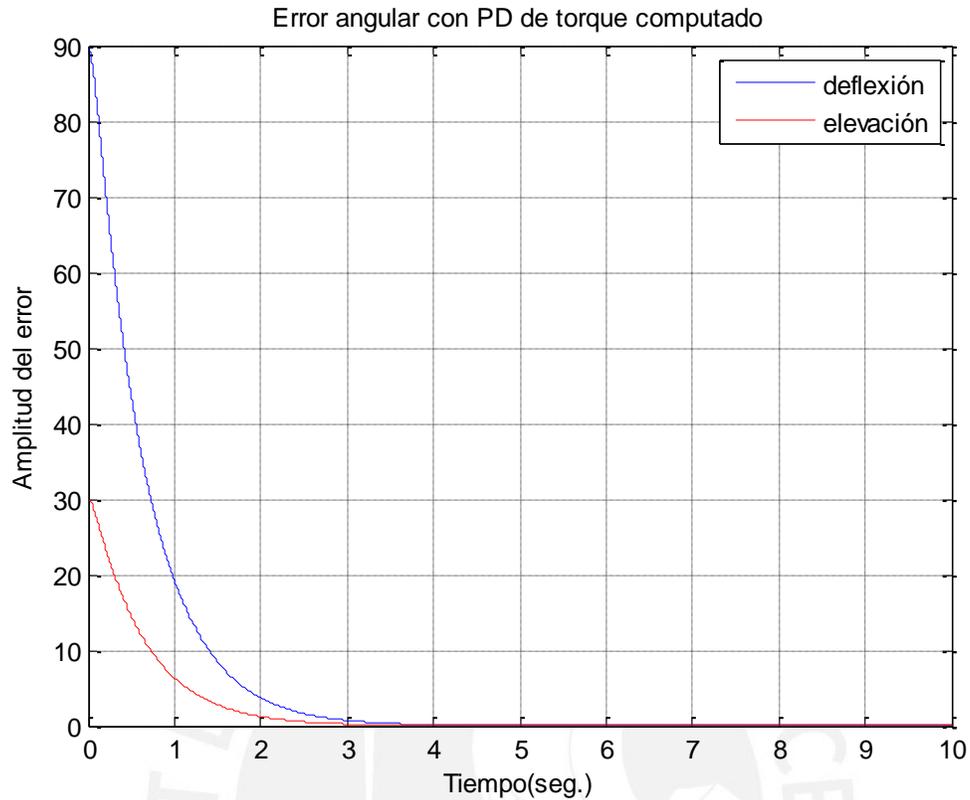


Figura N°20: Error angular en radianes de la caña con controlador PD de torque computado con buque blanco parado

Como observamos en la figura 20, la señal de control obedece a la señal de referencia tanto en la orden de elevación como de ronza en deflexión para los datos ingresados en el sistema de control de posición de la caña del montaje 76/62 mm., manteniendo una respuesta al sistema a los 3.15 segundos aproximadamente en deflexión y 3 segundos en elevación.

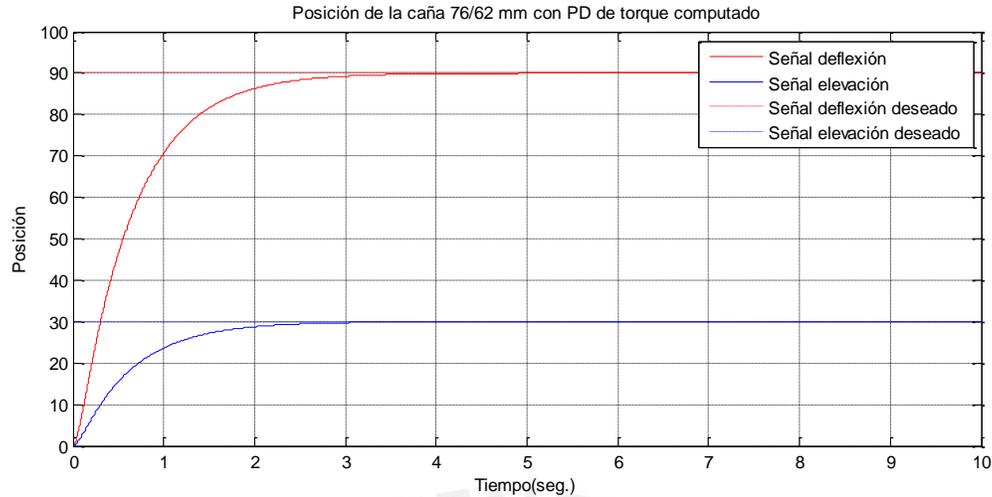


Figura N°21: Tiempo de respuesta a la orden de la caña 76/62 mm. con controlador PD de torque computado con buque blanco parado

En la figura 21, la señal de control obedece a la señal de referencia deseada, llegando a un tiempo de respuesta de 3 segundos en elevación y de 4,8 segundos en deflexión para la orden de posición de la caña del montaje 76/62 mm.

Tabla N°3.- Datos balísticos y atmosféricos para ejecución tiro antiperficie con un buque blanco en movimiento y cambio de rumbo y velocidad propio, resto mismos datos

Temperatura Atmosférica	Presión Atmosférica	Distancia al blanco	Marcación al blanco	Rumbo propio	Velocidad propia
17 °C	29 pulg. Hg	11,000 metros	090°	040°	12 nudos

Rumbo blanco	Velocidad blanco	Cabeceo	Rolido	Guiñada	Dirección viento	Intensidad viento
130°	10 nudos	2	1	2	045°	18 nudos

Con estos datos de la tabla N°3, y teniendo como la señal de referencia el escalón, tenemos como ángulos de posición para la caña 76/62 mm:

Ángulo deseado en deflexión = 90.4611 (grados sexagesimales)

Ángulo deseado en elevación = 15.3028 (grados sexagesimales)

Al correr el programa, tenemos como respuesta del sistema en deflexión línea azul y en elevación en línea roja la siguiente:

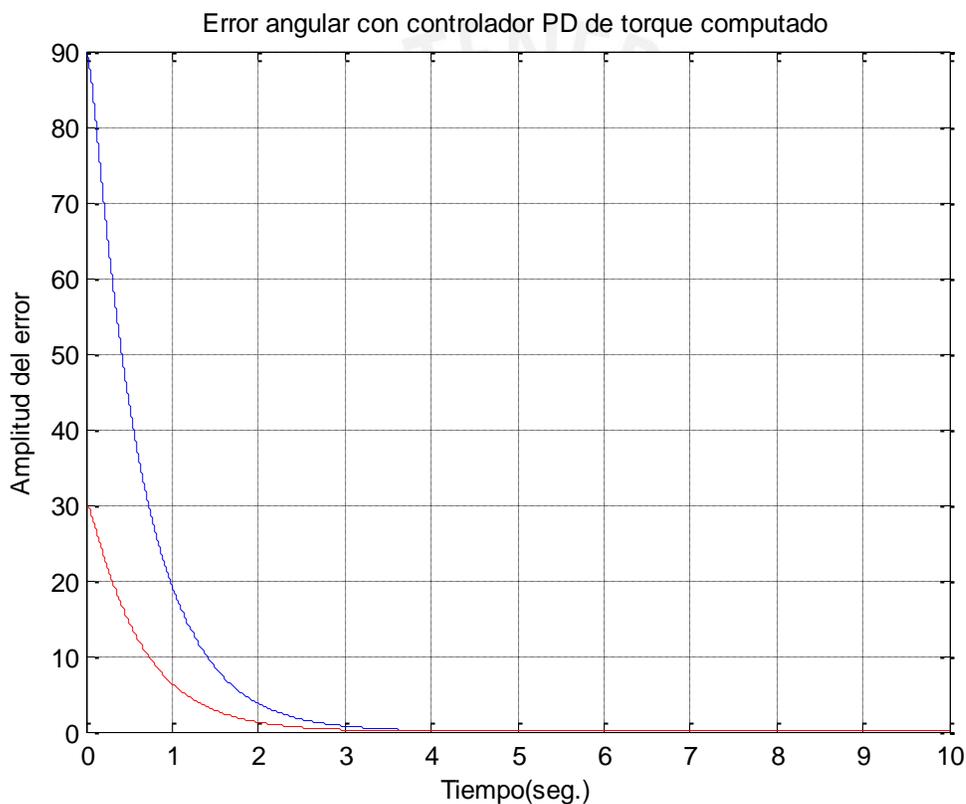


Figura N°22: Error angular en radianes de la caña con controlador PD de torque computado con buque blanco y propio en movimiento

Como observamos en la figura 22, la señal de control obedece a la señal de referencia tanto en la orden de elevación como de ronza en deflexión para los datos ingresados en el sistema de control de posición de la caña del montaje 76/62 mm., habiéndose realizado cambio de rumbo y velocidad del buque propio y con un buque

blanco en movimiento; manteniendo una respuesta al sistema a los 3.15 segundos aproximadamente.

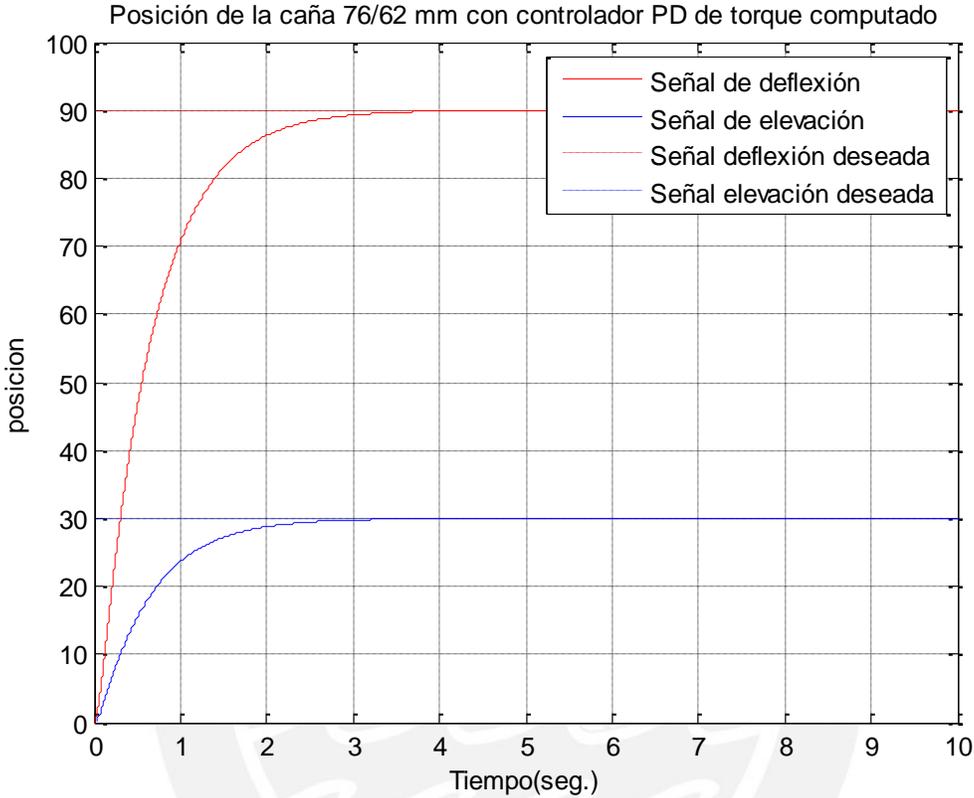


Figura N°23: Tiempo de respuesta a la orden de la caña 76/62 mm. con controlador PD de torque computado con buque blanco en movimiento

En la figura 23, la señal de control obedece a la señal de referencia deseada, llegando a un tiempo de respuesta de 3,15 segundos en elevación y de 3,6 segundos en deflexión para la orden de posición de la caña del montaje 76/62 mm.

Tabla N°4.- Datos balísticos y atmosféricos para ejecución tiro antiperficie con un buque blanco y propio en movimiento y cambio de datos atmosféricos y de condición de mar, resto mismos datos

Temperatura Atmosférica	Presión Atmosférica	Distancia al blanco	Marcación al blanco	Rumbo propio	Velocidad propia
17 °C	29 pulg. Hg	11,000 metros	090°	040°	12 nudos

Rumbo blanco	Velocidad blanco	Cabeceo	Rolido	Guiñada	Dirección viento	Intensidad viento
130°	10 nudos	3	2	3	200°	25 nudos

Con estos datos de la tabla N°4, y teniendo como la señal de referencia el escalón, tenemos como ángulos de posición para la caña 76/62 mm:

Ángulo deseado en deflexión = 88.6042 (grados sexagesimales)

Ángulo deseado en elevación = 16.8720 (grados sexagesimales)

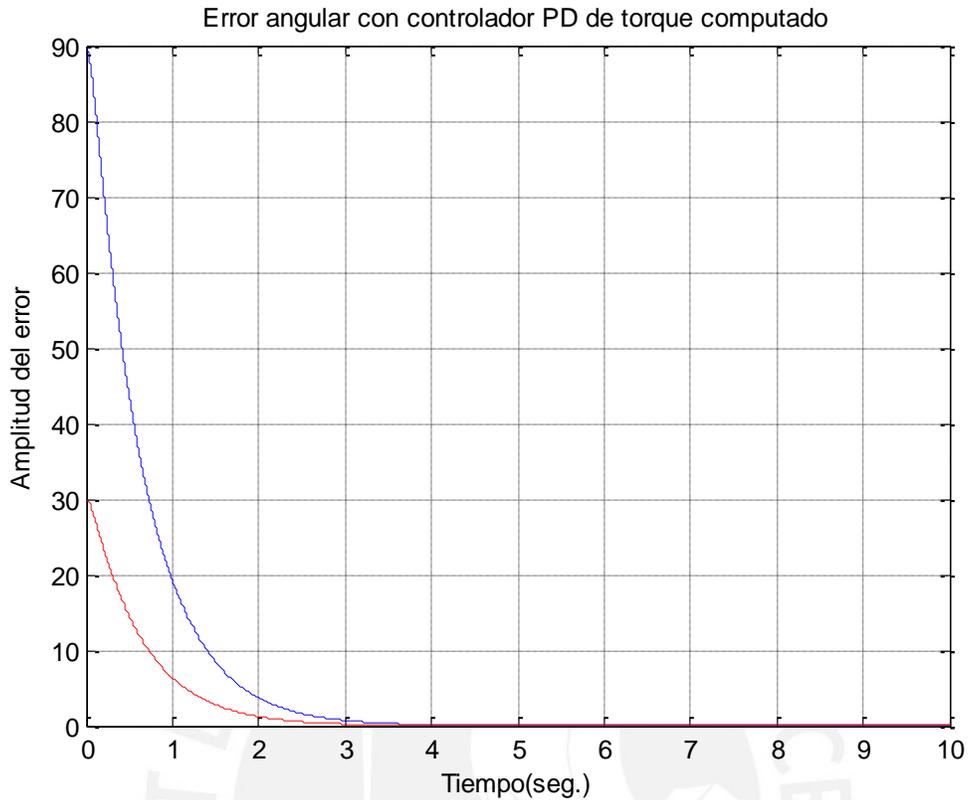


Figura N°24: Error angular en radianes de la caña con controlador PD de torque computado con buque blanco y propio en movimiento y cambio de condiciones atmosféricas

Como observamos en la figura 24, la señal de control obedece a la señal de referencia tanto en la orden de elevación como de ronza en deflexión para los datos ingresados en el sistema de control de posición de la caña del montaje 76/62 mm.

Habiéndose realizado cambios en las condiciones de mar y viento; se mantiene una respuesta al sistema a los 3.15 segundos aproximadamente.

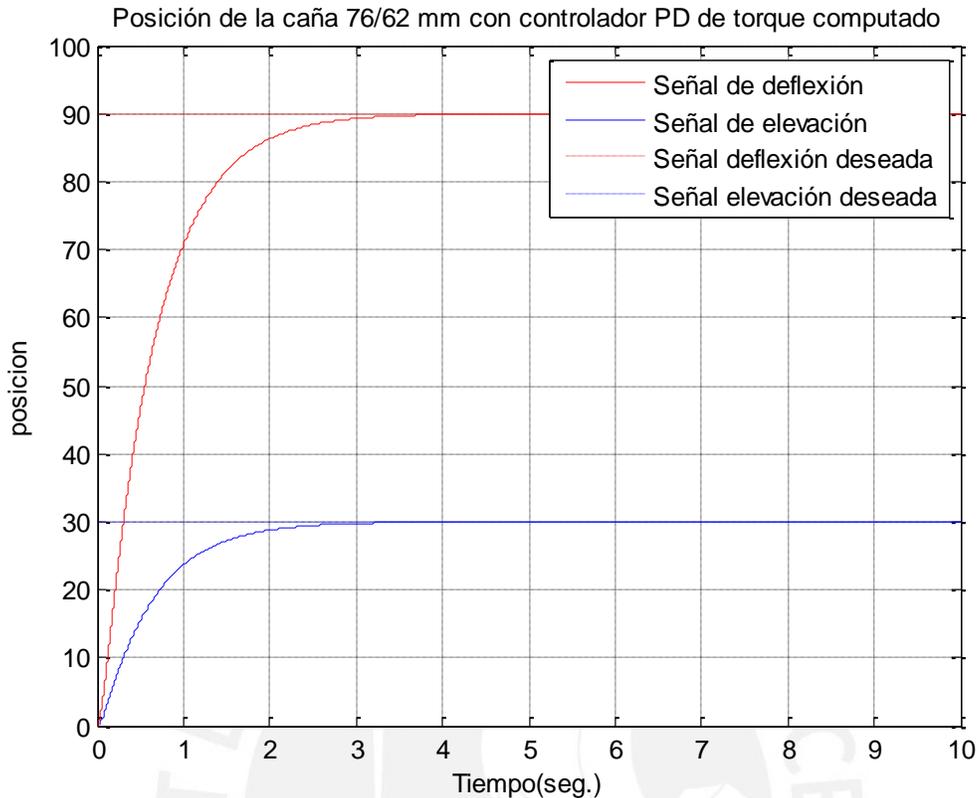


Figura N°25: Tiempo de respuesta a la orden de la caña 76/62 mm. con controlador PD de torque computado con buque blanco en movimiento y cambios de condiciones atmosféricas

En la figura 25, la señal de control obedece a la señal de referencia deseada, llegando a un tiempo de respuesta de 3,15 segundos en elevación y de 3,7 segundos en deflexión para la orden de posición de la caña del montaje 76/62 mm.

4.2 Comparación y análisis de resultados obtenidos.

Como se ha mencionado, el sistema de control de tiro del cañón 76/26 mm. de la corbeta misilera, idealmente al recibir la orden de designación del blanco elegido para realizar un tiro antiperficie, se posiciona al radar de control de tiro en la dirección ordenada iniciándose la búsqueda del blanco, una vez localizado el blanco

se inicia la solución del problema de tiro. Es importante en este paso establecer los valores de los componentes del movimiento del blanco, marcación y distancia.

Posteriormente, y con la finalidad de impactar en el blanco, es necesario calcular los ángulos de adelanto para el cañón, tanto en ronza o deflexión como en elevación. Asimismo, la orden de elevación del cañón está en función entre otros aspectos del alcance al blanco, los componentes del movimiento del blanco, del tirador, del viento a lo largo de la línea de tiro, de la densidad del aire y del cambio de velocidad inicial del proyectil. Todos estos datos se incluyen en la tabla de tiro del cañón 76 mm.

Estos procedimientos anteriormente mencionados, han sido simulados en el programa realizado en el capítulo 3 del presente trabajo; para posteriormente, al diseñar el controlador elegido, controlador PD de torque computado, iniciar la validación respectiva y pruebas de simulación del capítulo 4.

En ese sentido, después de haber realizado el control del sistema de posición de la caña del montaje 76/62 mm. con el controlador PD con torque computado (CTC), podemos observar en la Tabla N°5, que con la señal de entrada del tipo escalón, los tiempos en que el sistema llega a error cero, son los siguientes:

Tabla N°5.- Tiempo error a cero de respuesta al sistema con controlador PD CTC

Condiciones	Tiempo error a cero Deflexión	Tiempo error a cero Elevación
Buque blanco parado	3,15	3
Buque blanco en movimiento	3,15	3
Condiciones atmosféricas adversas	3,15	3

En ese sentido, el sistema controlado, responde a error cero en menos de 4 segundos, tanto en el requerimiento de ronza y elevación.

Asimismo, empleando los mismos factores proporcional y derivativo, podemos observar en la Tabla N°6, que con la señal de entrada del tipo escalón, los tiempos de respuesta a la señal deseada varían de acuerdo a los cambios de datos ingresados al sistema, tanto en cambios de rumbo, velocidad y de condiciones atmosféricas.

Estos datos se pueden dar en condiciones reales y dependen de cada instante que el buque tirador presente el requerimiento de realizar un tiro antisuperficie, observándose los siguientes para cada variación:

Tabla N°6.- Tiempo de respuesta al sistema con controlador PD CTC

Condiciones	Tiempo respuesta orden Deflexión (seg.)	Tiempo respuesta orden Elevación (seg.)
Buque blanco parado	4,8	3
Buque blanco en movimiento	3,6	3,15
Condiciones atmosféricas adversas	3,7	3,15

Asimismo, se puede observar en la tabla N°6 que el sistema controlado con torque computado, responde a las señales deseadas, tanto en el requerimiento de ronza y

elevación, para la posición de la caña del montaje 76/62 mm.; observándose que los tiempos de respuestas al seguimiento son variables, en promedio 3-4 segundos.

4.3 Conclusiones. -

Después de haber realizado el análisis, así como la comparación de resultados con la respectiva validación del modelo obtenido y el diseño del controlador, podemos concluir lo siguiente:

- Aprovechando el modelamiento del cálculo de tiro, se ha realizado la automatización empleando datos reales de la tabla de tiro, así como simulados para la validación y pruebas del procedimiento para realizar el tiro antisuperficie con el cañón 76/62 mm.
- Debido a la similitud con el cañón 76/62 mm. se ha empleado el modelo de un robot esférico de brazo articulado con dos grados de libertad, de gran analogía al movimiento de deflexión o ronza y al movimiento de elevación de la caña propiamente.
- La selección del controlador PD con torque computado (CTC) es apropiado para el modelo matemático de robot elegido, debido a su sencillez y flexibilidad con su modelo.
- El problema de estabilización y paralaje del cañón 76/62 mm. ha sido solucionado mediante técnicas matemáticas modernas, a pesar del rolido, guiñada y cabeceo que realiza el buque durante su navegación, producto de las perturbaciones internas y externas; así como también la diferencia de niveles entre las posiciones del radar y del cañón.

- Se ha efectuado cambios al rumbo del buque propio y blanco, a la dirección e intensidad del viento, así como también a las variaciones del movimiento del mar; en condiciones lo más reales posibles; comprobando que el controlador elegido es apropiado al tipo de sistema elegido, permitiendo reposicionar constantemente el eje del ánima, para mantener correctamente la línea de tiro, independientemente del movimiento del buque.
- Los tiempos de respuesta a las señales deseadas, así como también el tiempo para llegar al error cero angular de la señal de control, durante las simulaciones realizadas, son lo más reales al sistema del buque; de esta manera se mantiene la seguridad para que los motores de movimiento del cañón no sufran elevados voltajes.



CONCLUSIONES

- Después de haber culminado el trabajo de investigación, podemos indicar que se han cumplido con el objetivo de diseño del control que permite determinar la posición del cañón 76/62 mm. para ejecutar tiro antisuperficie abordo de una corbeta misilera, a través de un control PD con torque computarizado, empleando la técnica de control no lineal feedback linearization.
- Se eligió como mejor modelo matemático para el cálculo de tiro del cañón 76/62 mm., que el cañón sea considerado como un robot esférico articulado, de dos grados de libertad, considerando los movimientos de ronza y elevación de la caña como si fuese el brazo robot.
- Las técnicas de cambio de sistemas de coordenadas espaciales, sirvieron para solucionar los problemas de paralaje, así como también se empleó el método de Denavit-Hatemberg para corregir los problemas de estabilización.
- Se comprobó que el controlador diseñado cumple con las expectativas al controlar de manera óptima el ángulo de elevación y el ángulo de ronza o deflexión requeridos para realizar un tiro contra un blanco antisuperficie a una distancia determinada.
- Los resultados de las pruebas y análisis de resultados, muestran que el sistema de seguimiento funciona de manera satisfactoria, tanto en lazo abierto como en lazo cerrado, permitiendo el controlador alcanzar las posiciones solicitadas con un error menor al 5% tolerable.
- Las soluciones y técnicas propuestas permitirán superar los problemas de obsolescencia del sistema de cálculo de tiro en las corbetas misileras y reducir los costos de mantenimiento de la transmisión analógica, al haber obtenido una

solución práctica en el diseño de un nuevo controlador, que puede ser implementada con hardware y software existentes en el mercado.

- En el análisis de las pruebas de simulación realizadas, se pudo observar que el modelo elegido como control, corrige los cambios realizados al sistema al mismo tiempo para llegar a error cero, a diferencia del tiempo de respuesta para seguir la señal deseada, debido a los parámetros de distancia y marcación, así como los rumbos y velocidades del buque propio y blanco, que origina una dependencia del resultado del control respecto a estas variables.
- La respuesta a la señal de control obtenida, tiene como tendencia ser un sistema críticamente amortiguado, donde el factor proporcional que se le considera al controlador PD, es el que permite manejar los tiempos de respuesta a la señal de control, permitiendo de esta manera proteger los motores propios del montaje 76/62 mm.
- El presente trabajo sirve como base para la implementación de un sistema de seguimiento y control de la posición del cañón 76/62 mm., así como también para otros cañones de similares características, adaptándose los datos propios de cada sistema en los buques de la Marina de Guerra del Perú.

ANEXOS

- Anexo A.- Tabla de Tiro del Cañón Oto Melara 76/62 mm.
- Anexo B.- Factores externos que afectan el movimiento de un buque



BIBLIOGRAFÍA

- ALARCO, Alfonso (2014). Apuntes para el Oficial de Armamento de las Unidades de Superficie. Marina de Guerra del Perú.
- ALONZO M., Freddy. BRAVO, Miguel (2014). Diseño, construcción y control de un brazo robótico. Universidad San Francisco de Quito. Colegio de Ciencias e Ingeniería.
- ANDALUZ, Jorge y Avilez, Alberto (2013). Armamento Naval I. Escuela Superior de Guerra Naval Perú.
- ARNAEZ, Enrique (2015). Enfoque práctico de la teoría de robots con aplicaciones en Matlab. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- BADGWELL, Thomas (1996). An Overview of Industrial Model Predictive Control Technology.
- BAISTROCCHI, Alfredo (1952). Arte Naval. Barcelona, Editorial Gustavo Gili S.A.
- BARRIENTOS, L.F. Peñin, C. Balaguer, R. Aracil (1998). Fundamentos de Robótica. McGraw-Hill, España.
- BRYSON, A. E. (1996). Optimal Control—1950 to 1985. IEEE Control Systems Magazine.
- CORTÉS Parejo, José (2008). La representación Denavit-Hartenberg.
- CRAIG J.J. (2005). Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 3rd Ed. Pearson
- CRUZ, Matías Irving (2007). Rotaciones multidimensionales generales. Escuela de Ingeniería y Ciencias, Universidad de las Américas, Puebla México.
- GALILEI, Galileo (1638) Discurso y demostración matemática, entorno a dos nuevas ciencias.
- GOEBEL, Greg (2003). An Introduction To Fuzzy Control Systems.
- GOLTEN J, Verwer A. (1991). Control Systems Design and Simulation. McGraw Hill.

- JARAMILLO, Andrés (2005). Descripciones y Transformaciones Espaciales. México.
- JIMENEZ-LANDI, Antonio (1973). Barcos. Madrid, Águila S.A. Ediciones.
- JOHNSON, Charles; David Carlson; David C. Lay (2002). Linear Algebra Gems: Assets for Undergraduate Mathematics. The Mathematical Association of America.
- LANDAU & LIFSHITZ, (1991). Mecánica, Ed. Reverté, Barcelona.
- LEGARRETA Jon; Martínez, Raquel (2009). Dinámica de Robots. OCW.
- LEWIS, F.L., Abdallah, C.T., Pawson, D.M. (1993). Control of Robot Manipulators. MacMillan Ed.
- MARINA DE GUERRA DEL PERÚ. Tabla de Tiro Cañón 76/62 mm.
- MING, Tham y Mark J.Willi (1994) Advanced Process Control. Dept. of Chemical and Process Engineering. University of Newcastle.
- MING Tham (2002) Internal Model Control. "Introduction to Robust Control".
- MCKERROW, Philip (1991). Introduction to Robotics. Addison-Wesley Pub.
- PAUL, R. P. (1981) Robot manipulators: mathematics, programming, and control: the computer control of robot manipulators. Massachusetts.
- RIVERA, D. E. (2002) PID Controller Tuning using Internal Model Control: A Modern Approach.
- SANASIN Park, (2018). ME729 Advanced Robotics -Computed-Torque Control.
- SANCHEZ Menéndez, Fernando J. (2004). Geodesia y Cartografía (1ª edición).
- SPONG, M. y VIDYASAGAR, M. (1989) Robot Dynamics and Control. John Wiley & Sons, Inc.
- VALENCIA, Guillermo E., TURIZO John C., M E. (2009). Diseño de un controlador por torque calculado CTC de un robot manipulador Tipo SCARA. Universidad Antonio Nariño, Colombia.
- VERGARA, Juan (2006). Robótica. Ingeniería Informática.

Anexo A

Tabla de Tiro del Cañón 76mm

La presente Tabla de Tiro pertenece al cañón 76mm de la empresa Oto Melara, la cual ha sido elaborada bajo condiciones estándar. Contiene 22 columnas, iniciando en la columna de alcance, desde las 0 hasta las 15,000 metros, con cada 100 metros de aumento:

- Columna 1: Alcance (metros.)
- Columna 2: Angulo de Tiro (min.)
- Columna 3: Variación del Angulo de Tiro por 100 metros más de Alcance (min).
- Columna 4: Angulo de Caída (grados)
- Columna 5: Angulo de Caída (complemento de minutos)
- Columna 6: Angulo de Caída (minutos (C4*60+C5))
- Columna 7: Duración de la trayectoria (seg.)
- Columna 8: Velocidad Residual (pies/seg.)
- Columna 9: Deriva (metros.)
- Columna 10: Zona Batida para un Blanco de 20 pies de altura.
- Columna 11: Cota.
- Columna 12: Aumento de 10 pies/seg. en la Velocidad Inicial.
- Columna 13: Disminución de 1 libra de peso en el Proyectoil.
- Columna 14: Disminución del 10% en la Densidad del Aire.
- Columna 15: Disminución del 10°F en la Temperatura del Aire.
- Columna 16: Componente en alcance del Viento.
- Columna 17: Componente en alcance del Buque Propio.
- Columna 18: Componente en alcance del Blanco.
- Columna 19: Componente en deflexión del Viento.
- Columna 20: Componente en deflexión del Buque Propio.
- Columna 21: Componente en deflexión del Blanco.
- Columna 22: Variación de la Altura de Impacto por una variación de alza de 100 metros.

0	0	1	0	0	0	0	2952.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	1	3	0	3	3	0.11	2910.1	0	100	0	2	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0
200	4	2	0	5	5	0.23	2867.5	0	200	0	3	2	2	0	0	0	1	0	1	1	0	0
300	6	3	0	7	7	0.34	2824.8	0	300	0	5	3	3	1	1	1	2	0	2	2	0	0
400	9	2	0	9	9	0.46	2782.2	0	400	0	7	4	4	1	1	1	2	0	2	2	0	0
500	11	2	0	11	11	0.58	2739.5	0	500	0	9	5	6	1	1	2	3	0	3	3	0	0
600	13	3	0	14	14	0.7	2700.1	0	600	1	10	6	8	2	1	2	3	0	4	4	1	0
700	16	2	0	17	17	0.82	2657.5	0	700	1	12	7	10	2	2	2	4	0	4	4	1	0
800	18	3	0	20	20	0.94	2618.1	0	800	1	14	8	12	2	2	3	5	0	5	5	1	0
900	21	2	0	22	22	1.07	2578.7	0	900	1	15	8	14	3	2	3	5	0	6	6	1	0
1000	23	3	0	25	25	1.2	2536.1	0	1000	2	17	9	16	3	3	3	6	0	6	6	1	0

1100	26	2	0	29	29	1.33	2496.7	0	1100	2	19	10	18	3	3	4	7	1	6	7	1
1200	28	3	0	32	32	1.46	2457.3	0	1200	3	21	10	21	4	3	4	7	1	7	8	1
1300	31	3	0	35	35	1.6	2421.3	0	1300	3	22	11	24	4	4	4	8	1	7	8	1
1400	34	2	0	39	39	1.73	2381.9	0	1400	4	24	11	27	4	4	5	9	1	8	9	1
1500	36	3	0	43	43	1.87	2342.5	0	1500	4	26	12	30	5	5	5	10	1	9	10	1
1600	39	3	0	46	46	2.01	2306.4	0	1600	5	27	12	33	5	5	6	11	1	10	11	1
1700	42	3	0	50	50	2.16	2270.3	0	1700	6	29	13	36	6	5	6	11	1	10	11	2
1800	45	3	0	55	55	2.3	2231.0	0	1800	6	31	13	40	6	5	7	12	2	10	12	2
1900	48	3	0	53	53	2.45	2194.9	0	1900	7	32	14	44	7	6	7	13	2	11	13	2
2000	51	4	1	3	63	2.6	2158.8	0	2000	8	34	14	48	8	6	7	13	2	11	13	2
2100	55	3	1	8	68	2.75	2126.0	0	2100	9	35	14	52	8	6	8	14	2	12	14	2
2200	58	3	1	13	73	2.91	2089.9	0	591	10	37	15	55	9	7	8	15	2	13	15	2
2300	61	4	1	18	78	3.07	2053.8	0	548	12	39	15	60	9	7	9	16	3	13	16	2
2400	65	3	1	23	83	3.23	2021.0	0	506	13	40	15	64	10	7	10	17	3	14	16	2
2500	68	4	1	29	89	3.39	1988.2	1	463	14	42	15	68	10	7	10	17	3	14	17	3
2600	72	3	1	34	94	3.56	1955.4	1	434	16	43	15	73	11	8	11	18	3	15	18	3
2700	75	4	1	40	100	3.72	1922.6	1	402	17	45	15	78	11	8	11	19	4	15	19	3
2800	79	4	1	47	107	3.9	1889.8	1	370	19	46	16	83	12	8	12	20	4	16	20	3
2900	83	4	1	53	113	4.07	1857.0	1	347	20	47	16	88	13	9	12	21	4	17	21	3
3000	87	4	2	0	120	4.25	1824.1	1	323	22	49	16	93	14	9	13	22	4	18	22	3
3100	91	4	2	7	127	4.43	1791.3	1	304	24	50	16	98	14	10	13	23	5	18	23	4
3200	95	4	2	14	134	4.61	1761.8	1	285	26	51	16	103	15	10	14	24	5	19	24	4
3300	99	4	2	21	141	4.8	1732.3	1	268	28	53	16	108	16	11	14	25	6	19	25	4
3400	104	5	2	29	149	4.99	1702.8	1	253	31	54	16	114	17	11	15	26	6	20	26	4
3500	108	4	2	37	157	5.18	1673.2	1	239	33	55	16	120	17	12	15	27	6	21	27	4
3600	112	5	2	46	166	5.38	1643.7	1	224	36	57	15	125	18	12	16	28	7	21	28	5
3700	117	5	2	55	175	5.58	1614.2	1	211	38	58	15	131	18	13	16	29	7	22	29	5
3800	122	5	3	4	184	5.78	1584.6	1	201	41	59	15	137	19	14	16	30	8	22	30	5
3900	127	5	3	14	194	5.99	1558.4	2	189	44	60	15	143	20	14	17	31	8	23	31	6
4000	132	5	3	24	204	6.2	1532.2	2	179	47	61	14	149	21	15	17	32	9	23	32	6
4100	137	5	3	34	214	6.41	1502.6	2	170	51	62	14	155	22	16	17	33	9	24	33	6
4200	142	5	3	45	225	6.63	1476.4	2	162	54	64	14	161	23	16	18	35	10	25	35	7
4300	147	6	3	56	236	6.85	1450.1	2	153	58	65	14	167	24	17	18	36	10	26	36	7
4400	153	5	4	8	248	7.08	1423.9	2	145	62	66	13	174	25	18	19	37	11	26	37	7
4500	158	6	4	20	260	7.31	1397.6	3	138	66	67	13	180	26	19	19	38	11	27	38	8
4600	164	6	4	32	272	7.54	1374.7	3	132	70	68	13	186	27	20	19	39	12	27	39	8
4700	170	6	4	46	286	7.78	1348.4	3	125	75	69	12	192	28	21	20	41	12	28	40	8

4800	176	6	4	59	299	8.02	1325.5	3	120	79	70	12	199	29	22	20	42	13	29	42
9																				
4900	182	7	5	13	313	8.27	1299.2	3	113	84	71	12	206	30	23	20	43	14	29	43
9																				
5000	189	6	5	28	328	8.52	1276.2	3	108	90	72	11	212	31	24	20	44	14	30	44
10																				
5100	195	7	5	44	344	8.77	1253.3	4	103	95	73	11	219	32	24	21	45	15	30	45
10																				
5200	202	6	6	0	360	9.03	1233.6	4	98	101	74	11	225	33	25	22	47	16	31	47
11																				
5300	208	7	6	16	376	9.29	1210.6	4	93	107	75	10	232	34	26	22	48	16	32	48
11																				
5400	215	8	6	33	393	9.56	1190.9	4	88	113	76	10	238	35	27	22	49	17	32	49
12																				
5500	223	7	6	51	411	9.83	1171.3	5	83	120	77	10	245	36	28	23	51	18	33	51
12																				
5600	230	7	7	9	429	10.11	1151.6	5	79	126	78	9	252	37	29	23	52	19	33	52
13																				
5700	237	8	7	28	448	10.39	1135.2	5	75	134	79	9	259	38	30	24	54	20	34	54
13																				
5800	245	8	7	47	467	10.67	1118.8	6	73	141	80	8	266	39	31	24	55	21	34	55
14																				
5900	253	8	8	7	487	10.96	1102.4	6	70	149	81	8	272	40	32	25	57	22	34	56
14																				
6000	261	8	8	28	508	11.25	1089.2	6	67	157	82	8	279	41	33	25	58	23	35	58
15																				
6100	269	8	8	49	529	11.54	1072.8	7	64	166	83	7	286	42	34	26	60	24	36	60
15																				
6200	277	9	9	10	550	11.84	1059.7	7	61	175	84	7	293	43	35	26	61	25	37	62
16																				
6300	286	9	9	32	572	12.14	1049.9	8	59	184	84	6	300	44	36	27	63	26	37	63
17																				
6400	295	9	9	35	575	12.44	1036.7	8	57	193	85	6	307	45	37	27	64	27	38	65
17																				
6500	304	9	10	18	618	12.75	1026.9	9	55	203	86	5	314	46	39	27	66	28	38	66
18																				
6600	313	9	10	41	641	13.07	1013.8	9	53	214	87	4	322	47	40	28	67	29	39	68
19																				
6700	322	10	11	5	665	13.38	1003.9	10	51	225	88	4	329	48	41	28	69	30	40	
70																				
20																				
6800	332	9	11	30	690	13.7	994.1	10	49	236	88	3	336	49	42	28	70	31	40	71
20																				
6900	341	10	11	54	714	14.03	987.5	11	47	248	89	2	343	50	43	29	72	32	41	
73																				
21																				
7000	351	11	12	20	740	14.35	977.7	11	45	260	90	1	350	51	45	29	74	33	41	
74																				
22																				
7100	362	10	12	45	765	14.68	967.8	12	43	273	91	1	357	52	46	30	76	34	41	
75																				
23																				
7200	372	10	13	11	791	15.01	961.3	12	42	286	91	0	364	53	47	30	77	35	42	
77																				
23																				

7300 382 11 13 37 817 15.34 954.7 13 41 299 92 -1 371 54 48 31 79 37 42
 79 24
 7400 393 11 14 4 844 15.68 948.2 14 40 313 93 -1 378 55 49 31 81 38 43 81
 25
 7500 404 11 14 31 871 16.02 941.6 15 39 327 93 -2 385 56 51 31 82 39 43
 82 26
 7600 415 11 14 58 898 16.36 935.0 15 38 342 94 -3 392 58 52 32 84 40 44
 84 27
 7700 426 11 15 25 925 16.7 928.5 16 37 358 95 -4 400 59 53 33 86 41 45 86
 27
 7800 437 12 15 52 952 17.05 921.9 17 36 373 95 -4 407 60 54 33 87 43 45
 88 28
 7900 449 12 16 20 980 17.4 915.4 17 35 390 96 -5 414 61 55 34 89 44 46 89
 29
 8000 461 12 16 48 1008 17.75 912.1 18 34 406 97 -6 421 62 57 34 91 45 46
 91 30
 8100 473 12 17 16 1036 18.1 905.5 19 33 424 97 -6 428 63 58 35 93 46 47
 93 31
 8200 485 12 17 45 1065 18.46 902.2 20 32 441 98 -7 435 64 59 35 95 47 48
 95 32
 8300 497 12 18 13 1093 18.81 895.7 21 31 460 98 -8 442 65 61 35 97 49 48
 97 33
 8400 509 13 18 42 1122 19.17 892.4 22 30 478 99 -9 450 66 62 36 99 50 49
 99 34
 8500 522 12 19 11 1151 19.53 889.1 23 29 498 100 -10 457 67 64 36 100 51
 49 100 35
 8600 534 13 19 40 1180 19.89 885.8 24 28 517 100 -10 464 68 65 37 102 52
 50 102 36
 8700 547 13 20 9 1209 20.26 879.3 25 27 537 101 -11 472 70 66 37 104 53
 51 104 37
 8800 560 13 20 38 1238 20.63 876.0 26 26 558 102 -12 479 71 68 38 106 55
 51 106 38
 8900 573 13 21 8 1268 21 872.7 27 25 579 102 -13 486 72 70 38 108 56 52
 108 39
 9000 586 14 21 37 1297 21.37 869.4 28 25 601 103 -13 493 73 71 39 110 57
 53 110 40
 9100 600 14 22 10 1330 21.74 866.1 29 24 624 103 -14 500 74 72 39 112 58
 54 112 41
 9200 614 14 22 38 1358 22.12 862.9 31 24 647 104 -15 508 76 74 39 114 60
 54 114 42
 9300 628 14 23 9 1389 22.51 859.6 32 23 671 104 -16 515 77 76 40 116 61
 55 116 43
 9400 642 15 23 41 1421 22.9 856.3 34 23 695 105 -17 523 78 77 40 118 62
 56 118 44
 9500 657 14 24 12 1452 23.29 856.3 35 22 721 105 -18 530 79 79 41 120 63
 57 120 45
 9600 671 15 24 43 1483 23.68 853.0 36 22 746 106 -19 537 80 81 41 122 65
 57 122 46
 9700 686 15 25 15 1515 24.08 849.7 37 21 773 107 -20 545 81 83 41 124 66
 58 124 47

9800 701 16 25 46 1546 24.48 846.5 39 21 800 107 -20 552 82 84 42 126 68
 58 126 48
 9900 717 15 26 18 1578 24.88 846.5 40 20 827 108 -21 559 83 86 42 128 69
 59 128 50
 10000 732 15 26 50 1610 25.28 843.2 42 20 855 108 -22 567 84 88 42 130 71
 59 130 51
 10100 747 16 27 22 1642 25.69 839.9 44 20 884 109 -23 574 85 90 42 132 72
 60 132 52
 10200 763 16 27 53 1673 26.1 839.9 46 19 914 109 -24 581 86 92 42 134 73
 61 134 53
 10300 779 16 28 25 1705 26.51 836.6 47 19 944 110 -25 588 87 94 42 136 75
 61 136 54
 10400 795 16 28 57 1737 26.92 836.6 49 19 974 110 -26 595 88 96 43 139 76
 62 138 56
 10500 811 16 29 29 1769 27.34 833.3 51 18 1006 111 -26 603 89 98 43 141
 78 63 141 57
 10600 827 17 30 1 1801 27.76 833.3 53 18 1038 111 -27 610 91 100 43 143
 79 63 143 58
 10700 844 16 30 33 1833 28.18 833.3 54 18 1071 112 -28 618 92 102 43 145
 81 64 145 59
 10800 860 17 31 5 1865 28.6 830.1 56 17 1104 112 -29 625 93 104 43 147
 82 65 147 60
 10900 877 17 31 37 1897 29.02 830.1 58 17 1138 113 -30 633 94 106 43 149
 84 65 149 61
 11000 894 18 32 9 1929 29.45 830.1 60 16 1173 113 -31 640 95 108 43 151
 85 66 151 63
 11100 912 17 32 42 1962 29.89 826.8 62 16 1208 114 -32 648 96 110 44 154
 87 67 154 64
 11200 929 18 33 14 1994 30.32 826.8 65 16 1245 114 -33 655 97 112 45 157
 88 68 156 66
 11300 947 18 33 46 2026 3076 826.8 67 15 1282 115 -34 663 98 114 45 159
 90 68 158 67
 11400 965 18 34 19 2059 31.21 826.8 69 15 1320 115 -35 671 99 116 45 161
 92 69 161 68
 11500 983 18 34 51 2091 31.66 826.8 71 14 1359 116 -35 678 100 118 45 163
 93 70 163 70
 11600 1001 19 35 23 2123 32.1 826.8 74 14 1399 116 -36 686 101 120 46
 166 94 71 165 71
 11700 1020 18 35 55 2155 32.56 826.8 76 14 1439 117 -37 694 102 122 46
 168 96 72 168 72
 11800 1038 19 36 27 2187 33.01 826.8 78 13 1480 117 -38 701 103 124 46
 170 98 72 170 74
 11900 1057 19 36 59 2219 33.47 826.8 80 13 1522 118 -39 709 105 126 46
 172 99 73 172 75
 12000 1076 19 37 31 2251 33.93 826.8 83 13 1565 118 -40 716 106 128 47
 175 101 74 175 77
 12100 1095 20 38 3 2283 34.4 826.8 86 13 1608 119 -40 724 107 130 47
 177 102 75 177 78
 12200 1115 19 38 35 2315 34.86 830.1 89 12 1653 119 -41 732 108 133 47
 180 104 75 179 80

12300	1134	20	39	6	2346	35.33	830.1	91	12	1698	120	-42	740	109	135	47
182	106	76	182	81												
12400	1154	20	39	38	2378	35.8	830.1	94	12	1744	120	-43	748	110	137	48
185	107	77	184	83												
12500	1174	20	40	9	2409	36.28	830.1	97	12	1791	121	-44	756	111	139	48
187	109	78	187	84												
12600	1194	21	40	40	2440	36.77	833.3	100	11	1839	121	-45	764	112	141	48
189	111	78	189	86												
12700	1215	21	41	12	2472	37.26	833.3	103	11	1889	122	-46	772	113	144	48
192	113	79	192	87												
12800	1236	22	41	45	2505	37.26	833.3	106	11	1941	123	-46	779	114	146	49
195	114	80	195	89												
12900	1258	23	42	18	2538	38.28	836.6	109	11	1994	123	-47	787	115	148	49
197	116	81	197	91												
13000	1281	22	42	51	2571	38.79	836.6	113	11	2048	124	-48	795	116	151	49
200	118	82	200	93												
13100	1303	23	43	23	2603	39.31	839.9	116	10	2103	124	-49	803	117	153	49
202	120	82	202	94												
13200	1326	23	43	56	2636	39.84	839.9	120	10	2159	125	-50	811	118	156	49
205	122	83	205	96												
13300	1349	23	44	28	2668	40.37	843.2	123	10	2217	125	-51	819	119	158	50
208	124	84	208	98												
13400	1372	24	45	0	2700	40.9	843.2	127	10	2276	126	-52	827	120	160	50
210	126	85	210	100												
13500	1396	23	45	32	2732	41.44	846.5	130	10	2336	126	-53	835	122	163	50
213	127	86	213	102												
13600	1419	24	46	3	2763	41.99	846.5	134	9	2397	127	-54	844	123	165	51
216	129	87	216	104												
13700	1443	25	46	35	2795	42.54	849.7	138	9	2460	127	-55	852	124	168	51
219	131	87	219	106												
13800	1468	26	47	7	2827	43.09	853.0	142	9	2523	128	-56	860	125	170	52
222	133	88	222	108												
13900	1494	26	47	40	2860	43.67	853.0	146	9	2591	129	-57	868	126	172	53
225	135	89	225	110												
14000	1520	27	48	12	2892	44.26	856.3	151	9	2660	129	-58	876	127	175	53
228	138	90	228	112												
14100	1547	28	48	46	2926	44.87	859.6	155	8	2733	130	-58	885	128	177	54
231	140	91	231	114												
14200	1575	29	49	20	2960	45.49	862.9	160	8	2808	130	-59	893	129	180	54
234	142	92	234	117												
14300	1604	30	49	54	2994	46.13	862.9	165	8	2886	131	-60	901	130	182	55
237	144	93	237	119												
14400	1634	30	50	29	3029	46.77	866.1	171	8	2966	131	-61	909	131	185	56
241	146	94	241	121												
14500	1664	31	51	3	3063	47.43	869.4	176	8	3048	132	-62	918	132	187	57
244	148	96	244	124												
14600	1695	31	51	37	3097	48.1	872.7	181	7	3132	132	-63	926	133	189	58
247	150	97	247	126												
14700	1726	32	52	11	3131	48.78	876.0	187	7	3219	133	-64	934	134	192	59
251	156	98	251	129												

14800 1758 34 52 46 3166 49.48 879.3 193 7 3310 134 -65 943 136 195 60
255 156 99 255 132
14900 1792 35 53 21 3201 50.2 882.5 199 7 3404 135 -66 951 137 197 61
258 158 100 258 134
15000 1827 37 53 58 3238 50.95 889.1 206 7 3504 136 -67 960 138 200 62
262 161 101 262 137



Anexo B

Factores externos que afectan el movimiento de un buque

La trayectoria o derrota de un buque como la Corbeta Misilera es realizada en base a la experiencia que le da su comandante y Oficiales del buque para compensar los variantes efectos externos no manipulables como el viento, la corriente y el mar, debiendo emplear el mejor rumbo o dirección, para compensar el cabeceo, balance y guiñada/rolido (ver figura N°1) que son producidos por esos factores externos.

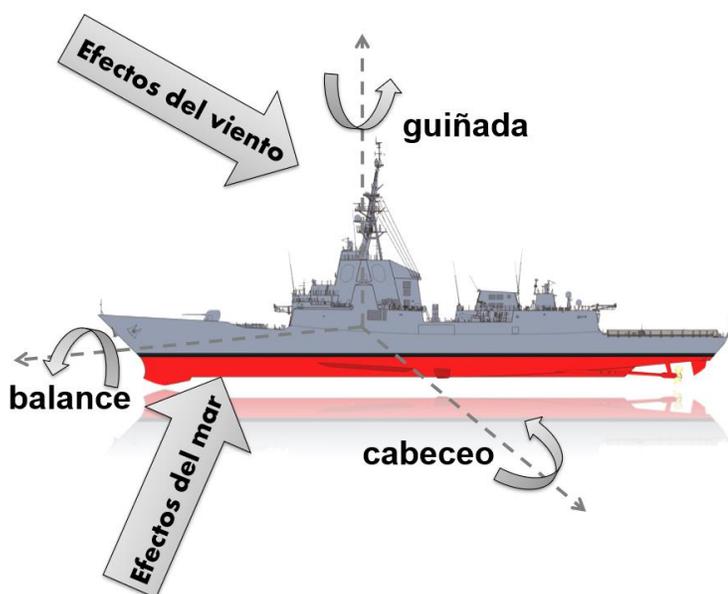


Figura N°1.- Efectos que sufre un buque en su movimiento trayectoria

Tanto los radares como el armamento propio del buque son afectados por el movimiento del buque navegando. En ese sentido, hace imperioso que cada buque maniobre para seguir su trayectoria a diferentes criterios, minimizando el movimiento del buque, y que cada sensor y arma cuente con un sistema que estabilice y compense el movimiento afectado.