

DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA EL POSICIONAMIENTO
DE UN BUQUE DENTRO DEL CANAL DE PANAMÁ

JULIÁN CAMILO MOGOLLÓN TORRES
EDYER EFREN BUITRAGO TRIANA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ, D.C.
2017

DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA ORIENTACIÓN DE
UN BUQUE DENTRO DEL CANAL DE PANAMÁ

JULIÁN CAMILO MOGOLLÓN TORRES
EDYER EFREN BUITRAGO TRIANA

Proyecto de Grado

Director:
MSc. José Roberto Cuarán Valenzuela

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ, D.C.
2017



La presente obra está bajo una licencia:
Atribución 2.5 Colombia (CC BY 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/co/>

Usted es libre de:

- Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
- hacer obras derivadas
- hacer un uso comercial de esta obra



Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

A nuestras familias, quienes a pesar de los inconvenientes, siempre nos brindaron su apoyo en nuestro proceso de aprendizaje, recibimos de ellos una educación en principios y valores, los cuales hoy y tras cinco años de carrera se ven reflejados permitiéndonos culminar esta etapa de nuestras vidas, es por ello que les dedicamos este logro, esperamos ser profesionales íntegros en el desarrollo de la carrera y que el futuro nuestro y el de nuestras familias siempre esté guiado por el buen aprendizaje.

De igual forma, agradecemos a las demás personas, que aun sin ser miembros de nuestras familias contribuyeron a nuestro desarrollo profesional.

AGRADECIMIENTOS

Presentamos nuestro más sincero agradecimiento, a todos los profesores que aportaron conocimiento a lo largo de la carrera, lo que nos permitió desarrollar el presente trabajo, especialmente agradecemos a nuestro Director de Tesis MSc José Roberto Cuarán, quien con su comprensión nos permitió enfocar y desarrollar el tema, la cual, a pesar de ser complejo, hoy con esfuerzo y dedicación pudo ser posible.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTOS.....	6
CONTENIDO	7
LISTA DE TABLAS	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE ANEXOS.....	13
GLOSARIO	14
RESUMEN.....	15
INTRODUCCION	17
1. ANTECEDENTES	19
2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	23
3. OBJETIVOS	25
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	25
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	25
4. JUSTIFICACIÓN	26
5. DELIMITACIÓN.....	28
6. MARCO TEORICO.....	29
6.1 ESCLUSAS.....	29
6.2 COMPUERTAS	30
6.3 MATLAB	31
6.4 CONTROL	32
6.4.1 PLANTA	32
6.4.2 PROCESO	32
6.4.3 SISTEMA	32
6.4.4 CONTROL:.....	33
6.4.5 SISTEMA DE CONTROL.....	33
6.4.6 ENTRADA DE UN SISTEMA	33
6.4.7 ENTRADA DE UN SISTEMA DE CONTROL.....	33

6.4.8	SALIDA DE UN SISTEMA DE CONTROL	33
6.4.9	REALIMENTACIÓN	34
6.4.10	REALIMENTACIÓN NEGATIVA	34
6.4.11	PERTURBACIONES	34
6.4.12	CONTROL DE REALIMENTACIÓN	35
6.4.13	SISTEMA DE CONTROL REALIMENTADO	35
6.4.14	CONTROL DE LAZO ABIERTO.....	35
6.4.15	SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO CERRADO.....	36
6.5	SENSORES DE DISTANCIA.....	37
6.6	MANIOBRAS DE AMARRE	37
6.6.1	AMARRE CON ESTACHAS.....	38
6.6.2	AMARRE CON CABLE	39
6.6.3	AMARRE MIXTO.....	39
6.7	MODELO MATEMÁTICO DE UN BUQUE.....	39
6.7.1	SISTEMA CON SEIS GRADOS DE LIBERTAD.....	39
6.7.2	SISTEMA CON CUATRO GRADOS DE LIBERTAD.....	42
6.8	MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL GOBIERNO DE BARCOS	43
6.8.1	NOTACIÓN PARA DESCRIBIR EL MOVIMIENTO DE UN BARCO..	43
6.8.2	ECUACIONES DINÁMICAS CON 3 GRADOS DE LIBERTAD	46
7.	MISIÓN ACADÉMICA	47
8.	METODOLOGÍA.....	58
8.1	VALIDACIÓN DEL PROBLEMA	58
8.2	PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL	59
8.3	MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA.....	59
8.4	SIMULACION DEL SISTEMA.....	59
9.	DESCRIPCION DE LOS ELEMENTOS	61
9.1	MATLAB	61
9.2	MSS GNC	62
9.3	MSS HYDRO	63
9.4	CAJA DE HERRAMIENTAS FDI DE MSS.....	63
10.	DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO	64

11. IMPLEMENTACIÓN	67
11.1 MODELADO DEL BUQUE	67
11.2 MODELADO DEL SISTEMA BUQUE-CILINDROS	74
11.3 PRUEBA DEL MODELO DEL BUQUE	76
11.3.1 PRUEBA EN LAZO ABIERTO DEL MODELO BUQUE-CILINDROS	79
11.3.2 PRUEBA EN LAZO CERRADO	79
12. CONCLUSIONES.....	82
BIBLIOGRAFIA.....	83
ANEXOS.....	86

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1:Ventajas de la simulación contra problemas del sistema real.....	20
Tabla 2: Número de estachas y su distribución con respecto al atraque	38
Tabla 3: Nomenclatura utilizada para describir el movimiento del barco.	44

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Los 6 Movimientos que Realiza un Buque Cuando se Encuentra Atracado, 3 Desplazamientos y 3 Rotaciones.....	19
Figura 2: Buque navegando en un canal	21
Figura 3: Esclusa de Miraflores en mantenimiento	29
Figura 4: Compuertas de Esclusas de Miraflores	30
Figura 5: Compuertas de Esclusas de Cocolí	31
Figura 6: Sistemas de Control de lazo Abierto.....	35
Figura 7: Sistema de Control Lazo Cerrado.....	36
Figura 8: Amarre para buques de gran tamaño	37
Figura 9: Sistema con 6 Grados de libertad.....	40
Figura 10: Variables de Movimiento de un Buque	41
Figura 11: Variables Complementarias de Movimiento de un Buque	42
Figura 12: Sistema de Coordenadas con la Definición de Ángulos y Velocidades	44
Figura 13: Esclusas de Miraflores en mantenimiento	48
Figura 14: Paso de Buque por esclusas de Miraflores remolcado por locomotoras	48
Figura 15: Sensores de Posicionamiento instalados en las esclusas de Miraflores	49
Figura 16: Sistema de control antiguo	50
Figura 17: Pantallas programas de control	50
Figura 18: Monitoreo de esclusas con cámaras.....	51
Figura 19: Barco remolcador en proa en esclusas de Cocolí	52
Figura 20: Barco remolcador en popa en esclusas de Cocolí.....	52
Figura 21: Barreras Dañadas Utilizadas para Protección de Paredes de las Esclusas de Cocolí	53
Figura 22: Nuevo Sistema de Barreras Utilizado en Esclusas de Cocolí	54
Figura 23: Sensor de presencia instalado en las esclusas de Cocolí	54
Figura 24: Tinas ahorradoras de agua de esclusas de Cocolí.....	55
Figura 25: Válvulas de esclusas de Cocolí	56
Figura 26: Sistema de potencia para accionamiento de válvulas	56
Figura 27: Torre de control de esclusas de Cocolí.....	57
Figura 28: Flujograma de metodología planteada.....	58
Figura 29: Render vista superior recorrido del buque dentro del canal, guiado por los cilindros	64
Figura 30: Render de cilindro ubicado en la proa del buque, previo iniciar recorrido	65

Figura 31: Render de cilindro ubicado en la popa del buque, finalizando recorrido	65
Figura 32: Render de prototipo de cilindro a instalar	66
Figura 33: Buque en eje X y eje Y	69
Figura 34: Descripción de parámetros del bloque Supply Vessel de la librería MSS GNC de Matlab	72
Figura 35: Estructura del modelo	73
Figura 36: Diagrama de fuerzas que actúan en el buque.	75
Figura 37: Simulación del modelo del sistema masa-resorte-amortiguador del sistema buque-cilindros.	76
Figura 38: Sistema en lazo abierto del buque.....	77
Figura 39: Fuerza aplicada	77
Figura 40: Gráfica variación de posición respecto al tiempo.....	78
Figura 41: Velocidad respecto al tiempo.....	78
Figura 42: Salida de sistema en lazo abierto del vector eta.....	79
Figura 43: Diagrama de bloques de lazo cerrado.	80
Figura 44: Grafica de posición lazo cerrado	81
Figura 45. Locomotora Remolcadora en Mantenimiento	86
Figura 46. Barco Remolcador "Colon"	86
Figura 47. Motor y Encoder para Movimiento de las Compuertas de Esclusas de Cocolí.....	87

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Fotos Visita Técnica	86

GLOSARIO

ARFADA: Movimiento ascendente y descendente de un buque por el oleaje.

BALANCEO: Movimiento voluntario o involuntario producido por las olas del mar.

BUQUE: Barco de grandes dimensiones utilizado para fines comerciales.

CABECEO: Movimiento del buque en la dirección proa-popa, subiendo y bajando alternativamente.

CALADO: Distancia vertical entre el punto de línea de flotación y la base del barco.

CANAL: Construcción destinada al transporte de fluidos generalmente utilizada en agua a diferencia de las tuberías es abierta a la atmosfera.

ESCLUSAS: Obras hidráulicas que permiten ascender o descender de nivel barcos.

ESLORA: Longitud de una embarcación.

ESTACHAS: Cuerdas gruesas utilizadas para el amarre de buques.

GUIÑADA: Desvió de la proa del buque hacia un lado u otro.

MANGA: Anchura de un barco.

NEOPANAMAX: Buques diseñados para pasar con exactitud el nuevo canal de Panamá.

NORAY: Poste donde se amarra un barco o buque.

SPRINGS: Amarras que se colocan en diagonal, partiendo desde la proa en dirección hacia la popa.

TRAVES: Cada lado o costado del barco en donde se estrecha el buque formando la proa.

RESUMEN

Código	Nombre	Doc. Identidad	Teléfono	E-Mail
702035	Julián Camilo Mogollón Torres	1014207766	3138737377	jcmogollon35@ucatolica.edu.co
702011	Edyer Efrén Buitrago Triana	1022392827	3227359566	eebuitrago11@ucatolica.edu.co

El desarrollo de este trabajo de grado, se realizó tras la observación de una problemática encontrada en la visita realizada al Canal de Panamá. La problemática tiene que ver con los choques que se presentan entre los buques y las paredes de las esclusas al interior del canal y tras su paso por el mismo. Identificado el problema, se planteó la idea de desarrollar un modelo matemático que permita comprender mejor los movimientos que realiza un buque dentro de las esclusas y así poder controlar estos movimientos con el fin de darle el posicionamiento ideal y que a su paso por el canal no tengan ningún tipo de inconveniente.

Con la visita técnica realizada al canal de Panamá en agosto de 2017, se evidenció que las paredes al interior de este tienen una protección, pero que esta se daña constantemente y no es cambiada al instante, razón por la cual se deja averiada sin importar que con el paso de más buques su deterioro se vuelve mayor y es en este punto donde ocurren los choques y los daños tanto a las paredes de las esclusas como a los mismos buques.

De igual manera, se pudo evidenciar que, en el esclusaje de los buques, se utiliza un sistema de amarre que no es el ideal, dado que, al ser manipulado por operarios, estos podrían sufrir accidentes mientras realizan tal labor.

Con el análisis realizado, se concluyó que es necesario implementar un nuevo sistema de desplazamiento de los buques al interior del canal, pues como se evidenció, el choque de los buques obedece a múltiples factores que pueden ser corregidos y que permitirán que el paso de los buques se realice sin ningún tipo de inconveniente. Adicionalmente con un modelo de posicionamiento al interior del canal se va a garantizar que el buque no va a sufrir ningún daño y así las paredes de las esclusas tendrán una mejor duración y su mantenimiento será menos frecuente en el futuro.

Finalmente, es importante indicar que el desarrollo de este modelo fue realizado a través del programa de simulación (Matlab 2017a), que permitió comprender de una forma más clara las perturbaciones que hacen que el barco sufra alguna desviación

y se presenten los choques, problema que fue identificado y planteado con el objetivo de darle solución.

Palabras clave: Esclusas, Canal de Panamá, Modelo Matemático, 3 Grados de Libertad, Control, Buque, Matlab, Simulink

INTRODUCCION

Tras 101 años de funcionamiento, el canal de Panamá ha sido una de las mayores invenciones para la sociedad panameña, permitiendo con su evolución operaciones rentables, convivencia amigable con el ambiente y desarrollo sostenible.¹

Sin embargo, con la entrada en operación de las nuevas esclusas del canal de Panamá (esclusas de Cocolí y Agua clara), se encontró que son más frecuentes los choques al interior de estas durante el paso de buques de gran tamaño como lo son los Neopanamax, dado que estas no tienen un sistema de guiado en su interior.

Con la visita realizada a las esclusas de Cocolí, se pudo evidenciar que el problema de roces y choques que tienen los buques con las paredes de canal, es real, y que este se debe al cambio de posicionamiento que pueden sufrir a su paso por el mismo. Según la información recopilada, el piloto del buque es el encargado de realizar esta maniobra que en ocasiones termina en accidentes perjudiciales para el buque y el canal.

El objetivo del presente trabajo de grado, consistió en desarrollar una solución sencilla pero efectiva al problema planteado, a través de un modelo matemático que permita corregir y guiar el paso de los buques por el canal. Esto mediante el uso de sensores y actuadores, las cuales permiten que la posición del buque siempre este centrada y que su movimiento dentro de las esclusas se haga sin ninguna alteración.

Su finalidad permitirá que el movimiento sea controlado y que se haga sin inconvenientes, aun si existieran alteraciones en el medio, el sistema de control permitirá tener tiempos de respuesta óptimos al paso de cada uno de los buques por el canal.

Para ello, fue importante realizar una investigación sobre los movimientos que realizan los buques o barcos, tanto en aguas tranquilas como en aguas turbias, pues se requería tener clara tal información para así poder desarrollar el modelo matemático y de este poder desarrollar el sistema automático de control.

Normalmente, la representación del movimiento de un buque está dado por seis coordenadas independientes, 3 de traslación y 3 de rotación, las cuales representan un papel importante para entender los movimientos del barco en altamar y así mismo en un espacio cerrado como lo es el canal. No obstante, como se verá en este trabajo de grado, bajo las condiciones del canal, se pueden despreciar muchas variables y perturbaciones que afectarían la dinámica del buque en otros entornos.

¹ Ira E Bennett. (2017, abril) mi canal de panamá.
[Online].<http://micanaldepanama.com/nosotros/historia-del-canal/resena-historica-del-canal-de-panama/>

Finalmente, dado que en la ingeniería es importante realizar pruebas y simulaciones antes de la implementación y construcción de cualquier proyecto, más aún si su objetivo de desarrollo se encuentra encaminado a dar una solución o a mejorar algo que ya está construido y se encuentra en funcionamiento, en este trabajo se llevó a cabo una simulación del sistema de control propuesto, haciendo uso de Matlab 2017a, el cual dependió del desarrollo de un modelo matemático del sistema completo.

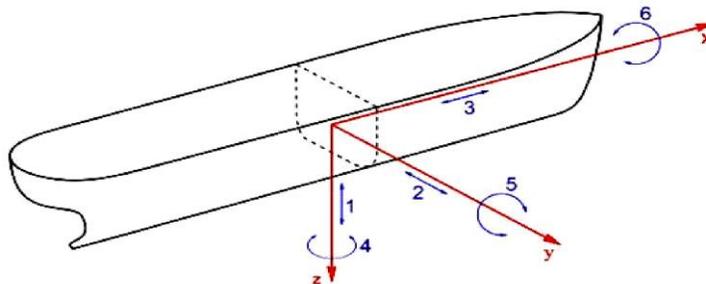
1. ANTECEDENTES

El control de ruta de embarcaciones empezó con la invención del giroscopio, que fue el primer sensor de realimentación del sistema. Esto se remonta a 1908 cuando el Dr. Kaempfe desarrolló el primer giroscopio, Skjetne (2003). Esto desencadenó en una serie de mejoras, para que finalmente Elmer Sperry generará un piloto automático, giropiloto, para el direccionamiento automático de un barco, recién en 1922 estuvo disponible comercialmente. El giropiloto, hoy conocido como autopiloto convencional, que es un sistema de control de simple entrada simple salida (Simple input simple output, Acrónimo en Inglés - SISO), donde la dirección es medida por un giroscopio y el error en dirección es compensado por acción del timón del barco².

Debido a su fácil configuración este tipo de control ha sido ampliamente usado y aún sigue siendo usado en algunos casos, sin embargo, con los avances tecnológicos y la introducción de nuevos sistemas, actualmente aún se llevan a cabo investigaciones que optimicen aún más estos sistemas de control.

Existen antecedentes internacionales en el campo de la ingeniería naval y oceánica, como por ejemplo la desarrollada por Villa³, la cual permite comprender mejor las condiciones que pueden alterar la posición de un buque cuando su motor se encuentra apagado, en la Figura 1 muestra los movimientos de traslación y rotación que son afectados por vientos y corrientes que se presentan en el lugar que se encuentra estacionado el buque.

Figura 1: Los 6 Movimientos que Realiza un Buque Cuando se Encuentra Atracado, 3 Desplazamientos y 3 Rotaciones



FUENTE: Villa, Raúl. 2015. Sistema de Amarre en Buques: Situación Actual y Evolución Futura. Tesis Doctoral. Coruña España: Facultad de Ingeniería. Ingeniería Naval y Oceánica, 2015.

² CACERES, Cayetano Generación y Control de Trayectoria para embarcaciones marinas en aguas poco profundas y espacios confinados, Tesis de Magister, Maestría en ingeniería de control y automatización, Perú: Pontificia Universidad Católica, Facultad de ingenierías, 2016, Pág. 11.

³ Villa, Raul. 2015. Sistema de Amarre en Buques: Situación Actual y Evolución Futura. Tesis Doctoral. Coruña España: Facultad de Ingeniería. Ingeniería Naval y Oceanica, 2015.

Es importante destacar la tesis de Mendoza⁴ de la Universidad de Concepción en Chile. Allí se describe el modelamiento del movimiento del barco, adicional también da una explicación de los principales dispositivos y esquemas de control utilizados en la estabilización de navíos.

En países donde la utilización de puertos es importante, se han realizado muchas investigaciones, con el fin de poder comprender mejor el impacto que tienen los diferentes factores que pueden afectar el movimiento de un buque. Así por ejemplo, en la Universidad de Cádiz España, profesores crearon un libro llamado “Modelado Y Simulación De Sistemas Aplicación Al Buque”⁵ donde ayudan al estudiante por medio de modelos matemáticos y simulaciones, a tener una mejor comprensión de las llamadas ciencias náuticas, así, también, complementan sus conocimientos en el área de comprensión de software de simulación, con el fin de que los alumnos tengan un enfoque en las diferentes disciplinas, además de tener una motivación a la investigación en temas relacionados con el modelado y la simulación (ver tabla 1).

Tabla 1:Ventajas de la simulación contra problemas del sistema real

	PROBLEMA SEL SISTEMA REAL	VENTAJA DE LA SIMULACIÓN
1	El sistema físico no está disponible, o es técnicamente inviable.	Se realiza si se desea experimentar antes de construir un sistema proyectado.
2	Experimento real caro, peligroso o no ético.	Simulación en laboratorio.
3	Perturbaciones no accesibles para manipulación y variables de estado tampoco para su medida.	Permite el acceso a todas las entradas y variables de estado.
4	Las constantes de tiempo no son compatibles con el experimentador.	Permite la aceleración o retardo de los experimentos. Permite la manipulación del modelo fuera del rango admisible del sistema físico, y observar su evolución en el tiempo y almacenarla.
8	No hay posibilidad de suprimir las perturbaciones.	Permite aislar efectos particulares, y facilita la comprensión del sistema.

Fuente: LOPEZ, Manuel, Modelado Y Simulación De Sistemas Aplicación Al Buque. 1 ed. Cádiz. España, 1997. Pág. 12.

⁴ Mendoza, Felipe. Estrategias de Conrol para Estabilizacion de Navios.Trabajo de grado.Ingeniero Civil Electronico Cocepcion,Chile: Universidad de Cocepcion,Facultad de Ingenieria.Departamento de Ingenieria Electrica 2009.

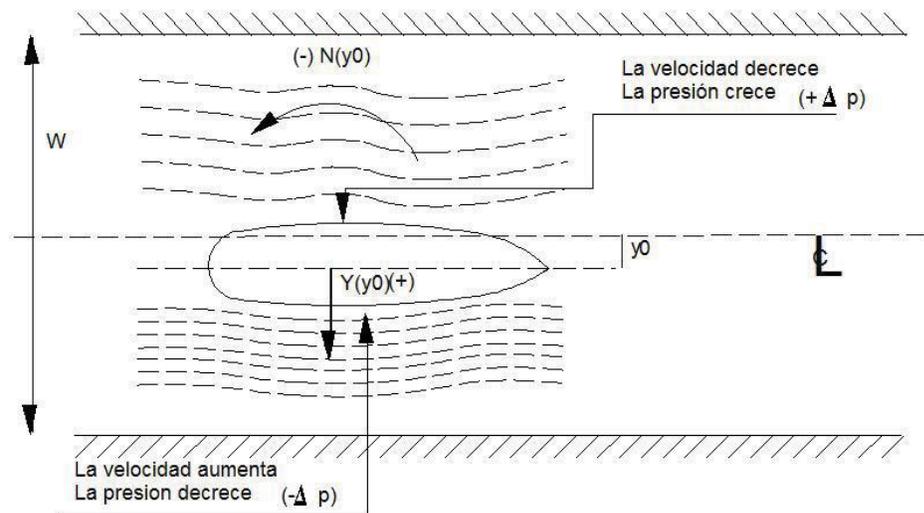
⁵ LOPEZ, Manuel, Modelado Y Simulación De Sistemas Aplicación Al Buque. 1 ed. Cádiz. España,1997.

Este libro, muestra de ejemplos de modelos matemáticos, referentes a buques en diferentes condiciones de navegación. Además de esto, ayudó a comprender mejor el comportamiento de un buque en canales, ya que “cuando un buque (normalmente simétrico respecto a su plano longitudinal) navega por un canal más cerca de una margen que de otra, hay un aumento de velocidad del flujo que corre entre el casco y la margen más cercana, al tiempo que hay una disminución de velocidad del flujo encauzado por el otro costado y la margen alejada”⁶.

Esto demostraría la teoría de que el agua también ayuda como colchón, para que el buque no roce con las paredes, esto no aplicaría a las esclusas de la ampliación del canal, debido a que a medida que la anchura del canal aumenta, estos efectos disminuyen.

En la figura 2 se explica el comportamiento de un buque dentro de un canal, la diferencia de presiones está dada por Y_{y_0} , es la que empuja al buque a la margen más cercana, $N_{(y_0)}$ lleva la proa al margen más alejado, el ancho del canal está dada por W , el largo por L , y_0 el centro del canal. También se explica que $(+\Delta p)$ al disminuir la velocidad el buque la presión del agua entre las paredes y el buque crece y $(-\Delta p)$ cuando la velocidad aumenta la presión del agua entre las paredes y el buque disminuye.

Figura 2: Buque navegando en un canal



Fuente: LOPEZ, Manuel, *Modelado Y Simulación De Sistemas Aplicación Al Buque*. 1 ed. Cádiz. España, 1997. Pág. 66.

⁶ Ibíd., p.66.

En la literatura se encuentran muchos modelos sobre embarcaciones en el mar, no obstante, no existen antecedentes de un modelo ajustado a las condiciones de un canal. Hay explicaciones de cómo actúa un buque en aguas poco profundas o aguas restringidas, las cuales dan a conocer los efectos que esto produce en un documento llamado ROM 3.1-99 (recomendaciones para obras marítimas) del aumento de la resistencia a la propulsión y que las cualidades de maniobra disminuyen cuando hay un desplazamiento a velocidades considerables, por esto el paso de los buques debe realizarse a una baja velocidad⁷.

Al disminuir la maniobrabilidad de los buques en aguas poco profundas, es importante que el curso del mismo, se encuentre guiado por factores de control externos, los cuales van a permitir reducir sus riesgos de choque a su paso por lugares cerrados, como lo es el canal.

Uno de los antecedentes más significativos, tuvo que ver con la visita realizada a las esclusas de Cocolí (nuevas esclusas del canal de Panamá), donde se aclararon muchas dudas, acerca del por qué no se ha implementado un sistema de guiado en estas; se trató de recopilar la mayor cantidad de información, la cual permitiría poder comprender mejor el problema.

Por otro lado, teniendo en cuenta que el canal no pararía sus operaciones si se decidiera realizar el montaje de un nuevo sistema de guiado de los buques y esto debido a que son pocos los antecedentes bibliográficos sobre el comportamiento de un buque en canales.

En las esclusas de Cocolí, se pudo evidenciar en tiempo real el paso de un buque, para así poder detallar los diferentes factores que pueden afectar su tránsito por estas. Esto permitió comprender mejor las especificaciones del modelo que se pretendió plantear; también se evidenció el riesgo que corren los operarios con la manipulación de las estachas, cuando se amarra el buque a las noray para poder realizar el llenado de las esclusas, esto impactó mucho, y motivo aún más el desarrollo de un sistema de control que permita dar solución a este inconveniente, y no poner en riesgo la vida de los operarios por la manipulación de estachas.

⁷ LLORCA, José. Proyecto de la Configuración Marítima de los Puertos; Canales de Acceso y áreas de Flotación (ROM 3.1-99), PUERTOS DEL ESTADO, Madrid, 2000. p. 123

2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Realizada la revisión bibliográfica, se evidenció que la seguridad dentro del canal de Panamá cuando los buques se encuentran transitando y realizando el procedimiento de esclusaje, debe mejorarse, pues se han presentado choques que involucran la estructura del buque con la infraestructura de las esclusas.

Con la construcción de la ampliación del canal de Panamá se han implementado grandes avances en la tecnología para el funcionamiento del mismo. Esta se desarrolló debido a que los buques con el pasar del tiempo eran de dimensiones mayores, y se necesitaba que el paso del buque minimizará los tiempos del recorrido, pero sin ningún tipo de inconveniente.

Se conoce que, en el canal de Panamá, en las antiguas esclusas, una locomotora es la encargada de dirigir y centrar el paso del buque, para evitar que se presenten choques entre este y las paredes del canal, esto con el fin de no afectar ninguna de las estructuras (Vasco⁸), cuando los buques crecieron en tamaño y ya no podían cruzar el canal de Panamá, se pensó en la ampliación del canal, la cual hoy en día ya es una realidad.

Cuando se realizó la construcción de la ampliación del canal de Panamá, las esclusas se construyeron de un mayor tamaño con respecto a las antiguas, pero no se tuvo en cuenta el mismo factor por el cual las antiguas esclusas tenían una locomotora para centrar el buque. En las nuevas esclusas, se realizó el proceso solo con dos barcos (remolcadores) uno en proa y otro en popa con los cuales se han presentado inconvenientes.

Estos inconvenientes, según lo reportado por Walt⁹, corresponden a choques que se han efectuado entre los buques y las nuevas esclusas del canal de Panamá. Dichos choques han afectado las estructuras de los buques y la infraestructura de las esclusas, cabe resaltar, que hay un equipo de personas que son las encargadas de realizar el proceso de centrado del buque, pero estas son insuficientes, si en algún momento hay alguna alteración en el medio por el cual transita el buque, no tienen la forma de poderlo controlar.

Dentro de las esclusas, hay unas barreras de plástico que recubren las paredes, implementadas para evitar cualquier tipo de choque, las barreras no han sido la

⁸ Vasco, D. (2017). El Canal de Panamá relega a sus mulas. [online] diariovasco.com. Available at: <http://www.diariovasco.com/20140216/mas-actualidad/sociedad/canal-panama-relega-mulas-201402161252.html>.

⁹ Walt Bogdanich, J. (2017). En menos de un mes, varios barcos han sufrido más de 100 choques leves en el nuevo Canal de Panamá. [online] Nytimes.com. Available at: <https://www.nytimes.com/es/2016/08/01/las-nuevas-fricciones-en-el-nuevo-canal-de-panama/> [Accessed 22 Oct. 2017]

mejor solución al problema, puesto que las mismas con el paso del tiempo también se van deteriorando y es necesario reemplazarlas y debido a los múltiples choques, este proceso se vuelve mucho más frecuente; es por esta razón que se requiere un sistema que ayude a que el buque quede centrado y no choque con ninguna de las paredes de las esclusas, o de hacerlo que cause el menor impacto que sea posible.

El Ingeniero Rafael Alvarado, gerente operativo de las esclusas de Cocolí, aclaró que en su momento, lo más importante era que el mismo entrara en operación de forma inmediata y toda vez que ya se contaba con las pruebas que se habían realizado con los barcos remolcadores, fue suficiente para que la operación iniciara, sin embargo, siempre se tuvo previsto que podía haber fallas en el esclusaje, siendo esta la razón por la cual se optó por colocar unas protecciones plásticas al interior de las esclusas, que efectivamente mitigan el problema y fueron la solución más fácil, pero poco eficiente.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo matemático de posicionamiento y guiado de buques dentro del canal de Panamá para evitar choques entre estos y la infraestructura de las esclusas.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar y recopilar información relacionada con proceso de posición y guiado de un buque dentro del canal de Panamá.
- Desarrollar un modelo de posicionamiento de un buque dentro de la esclusa.
- Implementar un sistema automático de control que corrija la posición del buque.
- Verificar la eficacia en el control del modelo.

4. JUSTIFICACIÓN

En el desarrollo del trabajo de grado, se evidenció un problema alarmante durante la operación del canal de Panamá, este tiene que ver con el proceso de encaminamiento y centrado del buque dentro del canal, el cual ha afectado los tiempos de tránsito y la seguridad de los buques; aun cuando los “capitanes y los remolcadores tiene una barrera que les sirve de guía para el ingreso al canal”¹⁰, mitigando con ello que se presenten accidentes mayores, puesto que esta barrera se encarga de neutralizar las corrientes y vientos al momento del ingreso para que el buque no sea empujado y se cambie su posición.

Dentro de las esclusas, también se pueden presentar corrientes y vientos que pueden afectar el tránsito del buque, ocasionando con ello que éste choque con las paredes plásticas que recubren y protegen las paredes de las esclusas, ocasionando que los buques también resultan afectados levemente.

Algunos expertos, no han estado de acuerdo con la utilización únicamente de las barreras de plástico, puesto que como ya se indicó resultan ineficientes, ellos han indicado “No es suficiente la información que se les entregó a los capitanes de los remolcadores para guiar los enormes buques que cruzan el canal”¹¹, pues se trata de un sistema diferente al que se utiliza en las esclusas antiguas. En las esclusas del antiguo canal se utilizan locomotoras para el remolque de los buques, estas se encuentran localizadas en las paredes, y permiten el desplazamiento del buque por el canal, hasta el momento ha sido un sistema práctico.

La construcción de la ampliación del canal se pensó como mejora al ya existente, para ello se requería que el mismo tuviera mayor cabida de agua, concreto mejor y más duradero y que las esclusas tuvieran mayor tamaño para tener la capacidad de recibir embarcaciones más grandes,

Sin embargo “Según decenas de entrevistas con obreros del canal, contratistas, expertos marítimos y diplomáticos, así como una revisión de registros internos y públicos, el nuevo proyecto no cumple con esas tres características”¹².

Como el canal ya se encuentra construido, el trabajo grado busca dar una solución simple y de bajo costo que ayude a mitigar o terminar los accidentes que se están presentando al interior de sus esclusas, no solo para proteger los barcos, sino

¹⁰ Walt Bogdanich, J. (2017). En menos de un mes, varios barcos han sufrido más de 100 choques leves en el nuevo Canal de Panamá. [online] Nytimes.com. Available at: <https://www.nytimes.com/es/2016/08/01/las-nuevas-fricciones-en-el-nuevo-canal-de-panama>.

¹¹ Ibíd.

¹² Walt Bogdanich, J. (2017). El nuevo Canal de Panamá: lo barato sale caro. [online] Nytimes.com. Available at: <https://www.nytimes.com/es/2016/06/24/el-nuevo-canal-de-panama-lo-barato-sale-caro/>.

también para garantizar que las paredes de las esclusas con los constantes choques no van a sufrir daños que con el tiempo van a generar un impacto mayor.

Con la visita realizada al canal, se confirmó que las investigaciones realizadas posteriormente son ciertas y que los problemas que existen con el paso de los buques es algo que necesita una pronta y efectiva solución. El ingeniero que realizó el recorrido al interior del canal de Panamá, manifestó que sí se ha pensado en una solución a este problema, pero que la misma tiene que ser implementada sin que se afecte el normal desarrollo de las operaciones.

5. DELIMITACIÓN

El desarrollo del modelo de posicionamiento de buques dentro del canal, para evitar el choque entre estos y las paredes de las esclusas, se enfocó en la manipulación y neutralización de las variables producidas por la alteración del medio, debido a que estas se involucran con su posicionamiento, pues una vez que ingresa al canal, va a estar sujetado con un sistema de amarre que le va a permitir tener una posición fija, razón por la cual su posicionamiento no va a variar por sí mismo sino por factores del medio.

Esta posición estará monitoreada, mientras dure el paso del buque por las esclusas, por tal motivo, la información de las distancias entre el buque y las paredes se requiere en tiempo real, para que así, si se debe corregir la posición se pueda realizar a través de los actuadores.

El sistema de control que se pretende desarrollar tiene que como objetivo, que el buque se pueda centrar y desplazar sin ningún tipo de afectación durante su paso por el canal. Este sistema se podrá implementar con un sistema de amarre, que a nivel mundial ya ha sido usado en algunos puertos, sin embargo, tendrá variaciones en cuanto a que será adaptado a una estructura de rieles, la cual, a lo largo del canal, tendrá una red de sensores que van a monitorear el posicionamiento del buque.

El desarrollo de trabajo de grado se realizará a través de un modelo en Matlab, que dará a conocer en primera instancia, el funcionamiento de los actuadores y sensores que se quieren utilizar para la elaboración de un modelo real, con su correcto funcionamiento este podrá ser utilizado no solo en el canal de Panamá, sino en otros puertos marítimos donde tengan problemas similares, permitiendo que este sistema le pueda dar una solución.

6. MARCO TEORICO

6.1 ESCLUSAS

Son diseñadas para que embarcaciones pasen de un nivel de agua a otro ya sea superior o inferior. Las esclusas son secciones del canal conformado por compuertas en sus extremos y donde se produce el llenado y vaciado de agua por medio de válvulas o aliviadero de agua, en el caso del canal de Panamá se producía por ductos que ayudados por gravedad hacen que el agua fluya para el vaciado o llenado de la misma, cuando el nivel de la esclusa se ha igualado al de la siguiente esclusa la compuerta correspondiente se abre y el barco entra o sale de la esclusa¹³.

Las esclusas que se pueden apreciar a continuación corresponden a las del Canal de Panamá original y la fotografía fue tomada durante la visita realizada a este.

Figura 3: Esclusa de Miraflores en mantenimiento



Fuente: Elaboración propia

¹³Esclusas ¿Qué son las esclusas y como pasarlas? Tipos. (En línea). Danfluvial. [Citado 09 de agosto 2017]. Disponible en internet. <URL: <http://www.danfluvial.com/esclusas-que-son-las-esclusas-y-como-pasarlas>>

6.2 COMPUERTAS

Es una placa móvil, plana o curva, que, al levantarse, girar o desplazarse, forma un orificio entre su borde inferior y la estructura hidráulica (presa, canal, etc.) sobre la cual se instala, y se utiliza para la regulación de caudales, en la mayoría de los casos, y como emergencia y cierre para mantenimiento de otras estructuras. Las compuertas tienen las propiedades hidráulicas de los orificios y, cuando están bien calibradas, también pueden emplearse como medidores de flujo¹⁴.

Durante la visita al canal, se fotografiaron las compuertas del canal original y también las que correspondieron a la ampliación de este.

Figura 4: Compuertas de Esclusas de Miraflores



FUENTE: Elaboración propia.

¹⁴ MARBELLO, Ramiro. Flujo a través de compuertas (en línea). Bogotá: Universidad Nacional de Medellín [Citado 03 de julio 2017]. Disponible en internet: <URL: <http://www.bdigital.unal.edu.co/12697/49/3353962.2005.Parte%209.pdf>>

Figura 5: Compuertas de Esclusas de Cocolí



FUENTE: Elaboración propia

6.3 MATLAB

Programa utilizado para realizar cálculos, utiliza un ambiente de programación donde es muy sencillo dar solución a problemas expresándolos con notaciones matemáticas, también permite resolver problemas que involucren matrices y vectores en poco tiempo. MATLAB puede ser utilizado en:

- Cálculos numéricos.
- Desarrollo de algoritmos.
- Modelado, simulación y prueba de prototipos.
- Análisis de datos, exploración y visualización.
- Graficación de datos con fines científicos o de ingeniería.
- Desarrollo de aplicaciones que requieran de una interfaz gráfica de usuario (GUI, Graphical User Interface)¹⁵.

Es también utilizado en investigaciones de temas específicos de ingeniería o matemática avanzada, en MATLAB existen los llamados “Toolbox” que para crear

¹⁵ SANCHEZ, José. Introducción a Matlab (en línea). Pereira: Universidad de Pereira [Citado 15 de septiembre 2017]. Disponible en internet. <URL: <http://blog.utp.edu.co/jnsanchez/files/2011/03/Matlab-Introducci%C3%B3n-clase13.pdf>>

entornos para el desarrollo de Procesamiento Digital de Señales, Sistemas de Control, Redes Neuronales, Lógica Difusa, Wavelets¹⁶.

6.4 CONTROL

6.4.1 PLANTA

Una planta se define como cualquier objeto físico que puede ser controlado, ya sea un equipo o simplemente las piezas que conforman una máquina que trabajan juntas para realizar una operación determinada. Ejemplos de plantas son: horno de calentamiento, reactor químico, etc¹⁷.

6.4.2 PROCESO

Un proceso se define como operaciones o pasos a seguir con un orden determinado. Estos pueden llegar a realizar cambios de un estado a otro con el fin de conseguir un resultado final. Es también denominado proceso a cualquier operación que se quiera controlar. Ejemplos de procesos son: químicos, económicos, biológicos, etc¹⁸.

6.4.3 SISTEMA

Un sistema es un conjunto de componentes conectados entre sí de tal manera que formen una unidad que cumple un objetivo, el sistema no solo puede estar asociado a objetos físicos también puede relacionarse con fenómenos abstractos o dinámicos como la economía. Cuando se hable de sistemas involucrará referirse a fenómenos físicos, biológicos, económicos, sociológicos, etc¹⁹.

¹⁶ SANCHEZ, José. Introducción a Matlab (en línea). Pereira: Universidad de Pereira [Citado 15 de septiembre 2017]. Disponible en internet. <URL: <http://blog.utp.edu.co/jnsanchez/files/2011/03/Matlab-Introducci%C3%B3n-clase13.pdf>>

¹⁷ PE REZ, Mario. Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo (en línea). San Juan, Argentina: Universidad Nacional de san Juan [Citado 13 de septiembre 2017]. Disponible en internet. <URL: <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>>, p.6

¹⁸ Ibíd., p. 6

¹⁹ Ibíd., p. 7.

6.4.4 CONTROL:

El autor Pérez Mario define control como “Esta palabra se usa para designar regulación, gobierno, dirección o comando”²⁰.

6.4.5 SISTEMA DE CONTROL

Conjunto de componente físicos conectados entre sí de tal manera que los componentes puedan dirigir, regular o dirigir otro sistema o así mismo, también pueden ser controlados dinámicamente”²¹.

6.4.6 ENTRADA DE UN SISTEMA

Variable del sistema que se elige para ser usada como excitación del mismo y que provoca la salida del sistema. Utilizada para analizar los efectos que produce una excitación en la entrada del sistema”²².

6.4.7 ENTRADA DE UN SISTEMA DE CONTROL

Variable de un sistema controlado, esta variable es elegida de tal manera que mediante su manipulación se logra que el sistema cumpla con su objetivo. Las variables que ingresan al sistema no dependerán de ninguna otra variable del mismo. Se debe tener en cuenta que hay señales no deseadas que pueden afectar el sistema como perturbaciones externas estas perturbaciones se comportan como una variable de entrada, el valor de estas variables no dependen de ninguna variable interna del sistema”²³.

6.4.8 SALIDA DE UN SISTEMA DE CONTROL

“Es una variable del sistema controlado que se elige de modo tal que mediante su estudio se analiza si el sistema cumple o no con los objetivos propuestos. Se verá más adelante que en los sistemas realimentados esta señal de salida contribuye a realizar el control propuesto”²⁴.

²⁰ *Ibíd.*, p. 7

²¹ *Ibíd.*, p. 7

²² *Ibíd.*, p.7

²³ *Ibíd.*, p.7

²⁴ *Ibíd.*, p. 7

6.4.9 REALIMENTACIÓN

Propiedad de los sistemas, permitiendo que la salida del sistema o cualquier variable pueda ser comparada con la entrada del sistema o con el componente que se desee comparar de tal manera que se pueda establecer una acción de control apropiada entre entrada y salida. La realimentación se da en un sistema cuando hay secuencias cerradas de relación causa y efecto con las variables del sistema. La realimentación en sistemas físicos se dificulta demostrar, pero se implanta realimentación con el fin de controlar y la función puede ser mejor identificada. La realimentación se puede dar positiva o negativamente depende de cómo quiero comparar las variable²⁵.

REALIMENTACIÓN POSITIVA

“Cuando ambas variables comparadas son de igual signo.”²⁶

6.4.10 REALIMENTACIÓN NEGATIVA

La realimentación se da cuando ambas variables que se van a comparar son de signo contrario, en control es muy utilizada la realimentación negativa. Los sistemas realimentados negativamente modifican las propiedades y características de los sistemas sin realimentación. Existen rangos que la realimentación negativa asigna a un sistema, como lo es el aumento de la exactitud, reduce los efectos de no linealidad y distorsión, aumenta el ancho de banda del sistema, disminuye la ganancia, pero el sistema puede ser menos estable²⁷.

6.4.11 PERTURBACIONES

Las perturbaciones son señales que tienden a afectar el valor de la salida de un sistema, existen dos tipos de perturbaciones, la interna es aquella que se da dentro del sistema y la externa es aquella que se genera fuera del sistema. Las perturbaciones ejercen cambios sobre los sistemas modificando el sistema de tal forma que se tiene que realizar el control²⁸.

²⁵ *Ibíd.*, p. 8.

²⁶ *Ibíd.*, p. 8.

²⁷ *Ibíd.*, p. 8.

²⁸ *Ibíd.*, p. 8.

6.4.12 CONTROL DE REALIMENTACIÓN

El control de realimentación es una operación que se realiza cuando existen presencia de perturbaciones que pueden afectar el sistema, lo que se busca es reducir el error. Se utiliza el control de realimentación se considera perturbaciones a cambios aleatorios pero que son difíciles de percibir, pero las perturbaciones pueden incluirse cuando se desarrolla el sistema, evitando desarrollar un control ²⁹.

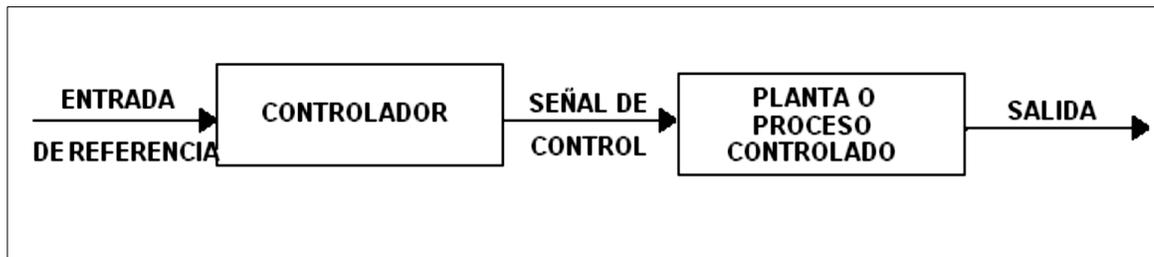
6.4.13 SISTEMA DE CONTROL REALIMENTADO

El sistema de control realimentado mantiene una correspondencia preestablecida entre la entrada y la salida, se comparan ambas para utilizar la diferencia como una variable de control. Los sistemas de control los podemos encontrar en áreas diferentes a la ingeniería como lo son la economía o la psicología³⁰.

6.4.14 CONTROL DE LAZO ABIERTO

Un sistema de control de lazo abierto, su salida no es realimentada ni comparada con la entrada, en un sistema de control de lazo abierto la salida no tiene efecto sobre la acción de control o la señal. La figura 6 muestra la forma de cómo se implementa un sistema de control de este tipo³¹.

Figura 6: Sistemas de Control de lazo Abierto



FUENTE: PEREZ, Mario. Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo (en línea). San Juan, Argentina: Universidad Nacional de san Juan [Citado 13 de septiembre 2017]. Disponible en internet. <URL: <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>>

Los sistemas de control de lazo abierto se dividen en dos partes, una es el controlador y la otra el proceso con el cual se va realizar el control. La señal de entrada es aplicada al controlador y la salida actúa como una señal de control, la

²⁹ *Ibíd.*, p.9.

³⁰ *Ibíd.*, p.9.

³¹ *Ibíd.*, p.10.

cual normaliza el proceso controlado de tal forma que actué con ciertas especificaciones o estándares establecidos. Existen casos simples donde el controlador solo necesita un filtro o un amplificador pero también hay casos más complejos que pueden llegar a necesitar un computador o microprocesadores³².

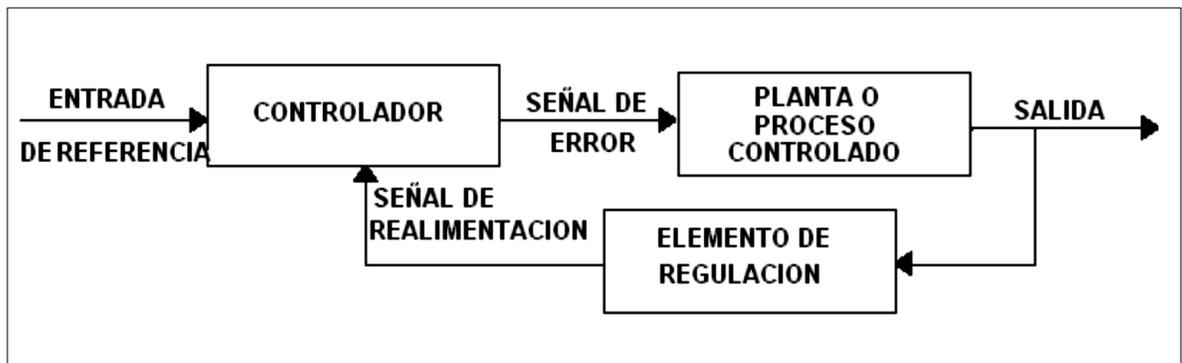
6.4.15 SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO CERRADO

Los sistemas de control de lazo cerrado la señal controlada o salida en la mayoría de los casos deben ser realimentadas o comparadas con la entrada, para así poder conocer la diferencia entre entrada y salida, para mitigar el error y corregir mejor la salida. Estos sistemas de control tienen como resultado una acción directa sobre la acción de control, ya que tienen que ser realimentados.

La diferencia que existe entre la señal de entrada y de salida es denominada señal de error, el lazo cerrado implica utilizar realimentación negativa para disminuir el error del sistema

La figura 7 muestra la relación entrada-salida de un sistema de control de lazo cerrado³³.

Figura 7: Sistema de Control Lazo Cerrado



FUENTE: PEREZ, Mario. *Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo (en línea)*. San Juan, Argentina: Universidad Nacional de san Juan [Citado 13 de septiembre 2017]. Disponible en internet. <URL: <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>>, p. 11.

³² *Ibíd.*, p. 10.

³³ *Ibíd.*, p. 11.

6.5 SENSORES DE DISTANCIA

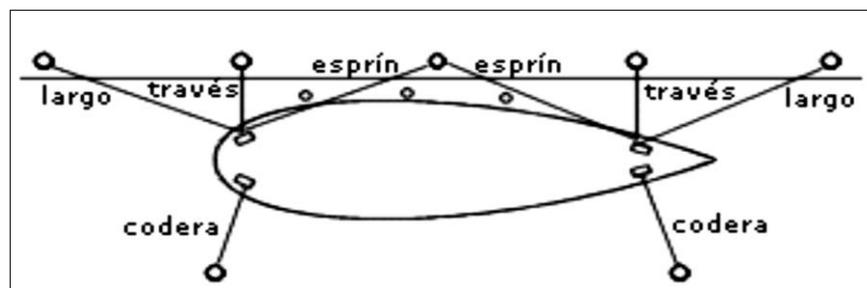
Los sensores de distancia fueron creados para realizar la medida de distancias lineales o verificar el desplazamiento lineal de una forma automatizada, los sensores pueden proporcionar señales eléctricas según la variación que se produzca en la distancia de los objetos a los que se desea censar. Existen diferentes rangos de medidas, esto dependerá del sensor escogido, en la industria hay modelos que tienen rangos de milímetros y otros modelos que pueden llegar a medir en el rango de los kilómetros³⁴.

6.6 MANIOBRAS DE AMARRE

Las maniobras de amarre consisten en asegurar los cabos cables o cadenas de un buque, embarcación o flotador que este en un puerto, muelle o canal, este amarre debe ser capaz de soportar viento, corrientes de agua y marea se trata de sujetar el buque para que permanezca en su posición mientras se encuentre sometido a la acción de los vientos, corrientes y mareas, estando atracado en puerto (ver figura 8).

Para realizar un “amarre” se debe tener en cuenta que el buque no solo debe estar parado, para esto se debe contar con un equipo e instalaciones que son llamados el sistema de amarre. El amarre se puede realizar de distintas maneras, de proa, de popa o de costado, para esto deben existir elementos auxiliares como amarras que conectan el buque con el puerto, máquinas para tensar y recoger las amarras y estibas de las amarras en el buque.³⁵.

Figura 8: Amarre para buques de gran tamaño



FUENTE: Repositorio VILLA, Raúl, Sistemas De Amarre En Buques: Situación Actual Y Evolución Futura. Tesis Doctoral. Ingeniero Naval y Oceánico. Coruña: Universidad de Coruña. Facultad de Ingeniería,2015.

³⁴ BURKHARDT, Thomas. Sensores de Desplazamiento y Distancia [En línea].Buenos Aires: Nortécnica S.R.L [citado 3 de junio, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.nortecnica.com.ar/pdf/teoria_sens_desp_dist.pdf

³⁵ VILLA, Raul, Sistemas De Amarre En Buques: Situación Actual Y Evolución Futura. Tesis Doctoral. Ingeniero Naval y Oceánico. Coruña: Universidad de Coruña. Facultad de Ingeniería,2015. p.12

En la figura 8 se explica una disposición de amarre para buques de gran tamaño, que puede valer, con las adaptaciones necesarias, para otros tipos de buques y muelles. Se disponen largos de proa y popa, “través” casi perpendiculares al buque y “Springs” cortos y paralelos al buque.

Las condiciones de las amarras se ven mejoradas al aumentar su longitud, por el hecho de estar los bolardos alejados del buque. Siendo el método de atraque y por tanto, de amarre, el de costado, el número de estachas y su distribución respecto al atraque, para buques petroleros (B/T) y para “Bulkcarriers (BULK), suele ser, como la establecida en la tabla 2 teniendo en cuenta su peso en Kilotoneladas (KT), así³⁶:

Tabla 2: Número de estachas y su distribución con respecto al atraque

TIPO	LARGO PROA	TRAVES PROA	ESPRIN PROA	ESPRIN POPA	TRAVES POPA	LARGO POPA	TOTAL
B/T<20 KT	3	1	2	2	2	3	13
20-40 (KT)	3	2	2	2	2	3	14
40-60 KT	3	2	2	2	2	3	14
>60 KT	4	2	2	2	2	3	15
BULK<20 KT	3	1	1	1	0	3	9
20-40 KT	3	1	1	1	0	3	9
>40 KT	3	2	2	2	1	3	13

FUENTE: VILLA, Raúl, Sistemas De Amarre En Buques: Situación Actual Y Evolución Futura. Tesis Doctoral. Ingeniero Naval y Oceánico. Coruña: Universidad de Coruña. Facultad de Ingeniería,2015.

6.6.1 AMARRE CON ESTACHAS

“En cuanto al número de estachas requerido para un amarre seguro, este dependerá mucho del criterio de los oficiales responsables, tanto de a bordo por parte del capitán u oficial de guardia, como ajenos al buque, como son el práctico (pilot); o del método y procedimiento de amarre que siga una determinada terminal: de tipo convencional”³⁷.

³⁶ *Ibíd.*, p. 14

³⁷ *Ibíd.* p.15.

6.6.2 AMARRE CON CABLE

“Para buques de gran desplazamiento o de máxima rigidez en el atraque, son más adecuados los cables de acero, ya que presentan menor elasticidad, disponen de mayor resistencia a la rotura, y poseen menor diámetro que permite su arrollamiento en carretes. No obstante, los primeros cabos que deben darse durante la maniobra de atraque son los de fibra sintética, al ser más elásticos y poseer mejor retención del movimiento de traslación del buque (vaivén)”³⁸.

6.6.3 AMARRE MIXTO

“Amarre con cabo y cable con la finalidad de obtener la elasticidad del cabo y la rigidez del cable”³⁹.

6.7 MODELO MATEMÁTICO DE UN BUQUE

6.7.1 SISTEMA CON SEIS GRADOS DE LIBERTAD

Partiendo de las leyes de la mecánica, en un sólido rígido con seis grados de libertad, teniendo en cuenta sus dos movimientos de rotación y traslación se obtienen las ecuaciones 1 y 2 que realizan el gobierno de un buque referidas a un sistema de referencia fijado en el propio barco (Abkowitz, 1969):⁴⁰

Para la traslación (fuerzas):

$$\begin{aligned} X &= m[u' + qw - rv - x_G(q_2 + r_2) + y_G(pq - r') + z_G(pr + q')] \\ Y &= m[v' + ru - pw - y_G(r_2 + p_2) + z_G(qr - p') + x_G(qp + r')] \\ Z &= m[w' + pv - qu - z_G(p_2 + q_2) + x_G(rp - q') + y_G(rq + p')] \end{aligned} \quad (1)^{41}$$

y para el giro (pares o momentos de fuerza):

$$\begin{aligned} K &= I_x p' + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} + pv - qu) - z_G(\dot{u} + ru - pw)] \\ M &= I_y q' + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} + qw - rv) - x_G(\dot{w} + pv - qu)] \\ N &= I_z r' + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} + ru - pw) - y_G(\dot{u} + qw - rv)] \end{aligned} \quad (2)^{42}$$

³⁸ Ibíd. p.15.

³⁹ Ibíd. p 15.

⁴⁰ LOPEZ, Manuel, Modelado Y Simulación De Sistemas Aplicación Al Buque. 1 ed. Cádiz. España, 1997, p.72

⁴¹ Ibíd. p 72.

⁴² Ibíd. p 72.

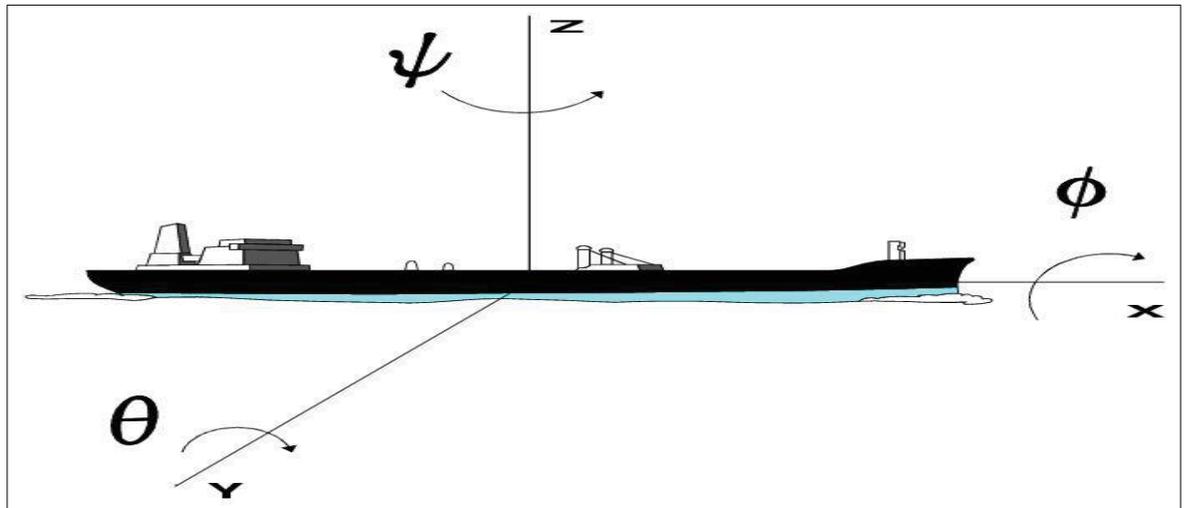
Los sistemas de referencia están situados en el buque, pero estos no tienen que coincidir con el centro de gravedad. Para mostrar mejor el significado gráfico de las variables del modelo en las figuras 9,10 y 11 se muestra. Las magnitudes que aparecen en las ecuaciones anteriores son:⁴³

- m : masa del barco.
- I_x, I_y, I_z : momentos de inercia respecto a cada eje coordenado.
- x_G, y_G, z_G : posición del centro de masas.
- φ, θ, ψ : Ángulos de giro respecto a los ejes coordenados (x, y, z) .
- $r = \dot{\psi}$, $p = \dot{\varphi}$, $q = \dot{\theta}$: velocidades angulares respecto a los tres ejes.
- u, v, w : componentes del vector velocidad referidos a los ejes coordenados (x, y, z) .

También se emplean como: V_x, V_y, V_z .

- X, Y, Z : componentes en cada eje de las fuerzas actuantes sobre el barco.

Figura 9: Sistema con 6 Grados de libertad



FUENTE. LOPEZ, Manuel, *Modelado Y Simulación De Sistemas Aplicación Al Buque*. 1 ed. Cádiz. España, 1997.p.73

- K, M, N : componentes en cada eje de los pares o momentos actuantes sobre el Buque.

⁴³ Ibíd. p 72.

En ingeniería naval es fundamental el empleo de sistemas de unidades específicos, para normalizar los modelos no lineales y mejorar el acondicionamiento numérico de las ecuaciones dadas por Lewis en 1989 ⁴⁴.

$$t' = L/v; \quad l' = L \quad m' = \frac{1}{2}\rho L^3 \quad (3)^{45}$$

y el sistema "prima-bis":

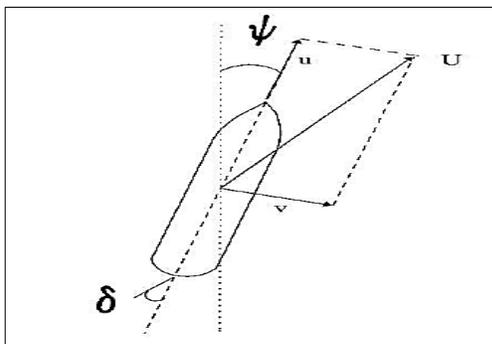
$$t'' = \sqrt{L/g}; \quad l'' = L; \quad m'' = m \quad (4)^{46}$$

Dónde:

- Los más utilizados son el llamado sistema "prima", que emplea como unidades: (t) de tiempo, (\underline{L}) longitud y (m) masa
- El sistema de prima-bis es la derivada del sistema prima
- L , es la longitud del buque (habitualmente especificada como longitud entre perpendiculares).
- g , es la aceleración de la gravedad
- V , es el módulo del vector velocidad del buque.

Se indican unas cantidades ya sean de tiempo, longitud y masa, estas están expresadas respectivamente con (') o (''). El sistemas de unidades utilizado es un estándar definido por la sociedad de arquitectos Navales e Ingenieros Marinos (SNAME) (Hagen, 1983; Lewis, 1989).⁴⁷

Figura 10: Variables de Movimiento de un Buque



FUENTE. LOPEZ, Manuel, Modelado Y Simulación De Sistemas Aplicación Al Buque. 1 ed. Cádiz. España, 1997.p. 74.

⁴⁴ Ibíd. p 73.

⁴⁵ Ibíd. p 73.

⁴⁶ Ibíd. p 73.

⁴⁷ Ibíd. p 73.

6.7.2 SISTEMA CON CUATRO GRADOS DE LIBERTAD

Al solo considerar el desplazamiento en el plano horizontal y el giro que realiza el buque en los planos (x, z), el sistema de 6 grados se reduce a uno de 4 grados de libertad. En las ecuaciones 5 y 6 se describe el movimiento en 4 grados de libertad⁴⁸.

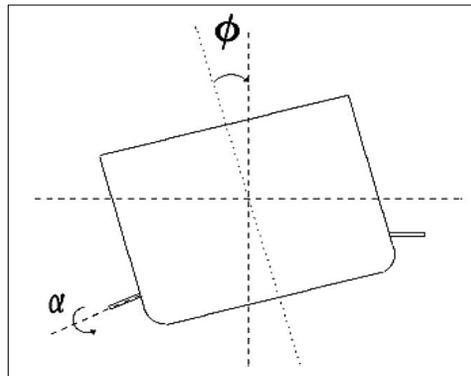
$$\begin{bmatrix} (1 - X''G) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1 - Y''v) & -L(Z''G + Y''p) & L(X''G - Y''r) \\ 0 & -(Z''G + K''vv) & L(K''xx - K''p) & -L(Z''GX''G + K''r) \\ 0 & (X''G - N''v) & -L(Z''GX''G + N''p) & L(K''^2zz - N''r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ p \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{tot} \\ Y_{tot} \\ K_{tot} \\ N_{tot} \end{bmatrix} \quad (5)^{49}$$

Donde el sub índice “tot” indica las fuerzas y pares totales actuando sobre el casco, debido a los efectos:

- H=hidrodinámicos
- Vi= viento
- Ola= olas
- Corr = corrientes ⁵⁰.

$$\begin{aligned} X_{tot} &= XH + Xvi + Xola + Xcorr \\ Y_{tot} &= YH + Yvi + Yola + Ycorr \\ N_{tot} &= NH + Yvi + Yola + Ycorr \\ K_{tot} &= KH + Kvi + Kola + Kcorr \end{aligned} \quad (6)^{51}$$

Figura 11: Variables Complementarias de Movimiento de un Buque



FUENTE. LOPEZ, Manuel, *Modelado Y Simulación De Sistemas Aplicación Al Buque*. 1 ed. Cádiz. España, 1997. p. 75.

⁴⁸ Ibíd. p 74.

⁴⁹ Ibíd. p 74.

⁵⁰ Ibíd. p 75.

⁵¹ Ibíd. p 75.

6.8 MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL GOBIERNO DE BARCOS

La simulación de sistemas de control para el gobierno de buques, ha hecho necesario desarrollar modelos dinámicos que conserven las principales características de comportamiento, permitan realizar una implementación sencilla. La dinámica de un buque se comporta como un sólido rígido, con 6 grados de libertad, con dos movimientos uno de rotación y otro de traslación en los 3 ejes cartesianos X, Y; Z.⁵²

El modelos de 3 grados de libertad está diseñado para que el buque realice sus movimiento en el plano horizontal, se puede linealizar con un intervalo alrededor del estado de equilibrio, los modelos no lineales actúan según las fuerzas de perturbación y movimientos hidrodinámicos.⁵³

Los modelos lineales sólo sirven para demostrar el movimiento del buque en línea recta. Para describir otro movimiento del buque, es necesario ingresar perturbación es no lineales en el modelo. En el caso de los buques portacontenedores o de aquellos que desarrollen altas velocidades, se considera el movimiento de balance, lo que genera modelos de cuatro grados de libertad.⁵⁴

6.8.1 NOTACIÓN PARA DESCRIBIR EL MOVIMIENTO DE UN BARCO

Para describir el movimiento de un buque en el mar, se realiza una descripción respecto al eje de referencia que se sitúa en tierra O que es un sistema inercial. Los movimientos de un buque se pueden representar con seis coordenadas, tres describen la traslación sobre los ejes X_B , Y_B y Z_B (avance desplazamiento lateral y arfada), esto se refiere a un sistema de coordenadas móvil que se sitúa en el buque O_B . Los otros tres movimientos son de rotación (balanceo, cabeceo y guiñada) esto se refiere a un sistema de coordenadas móvil que se sitúa en el buque O^{55} .

“La tabla 3 resume la nomenclatura que describe el movimiento de un buque y las fuerzas y momentos. Esta es la notación estándar recomendada para su utilización en las aplicaciones de maniobra y control de barcos”⁵⁶.

⁵² CHAVES, Jeremías, Aplicaciones de Control en Barcos. Monografía. Ingeniero Eléctrico. Universidad de Costa Rica. Facultad de ingeniería. Departamento de Automatica,2005. p.4

⁵³ Ibid., p. 4.

⁵⁴ Ibid., p. 4.

⁵⁵ Ibid., p. 4.

⁵⁶ Ibid., p. 5.

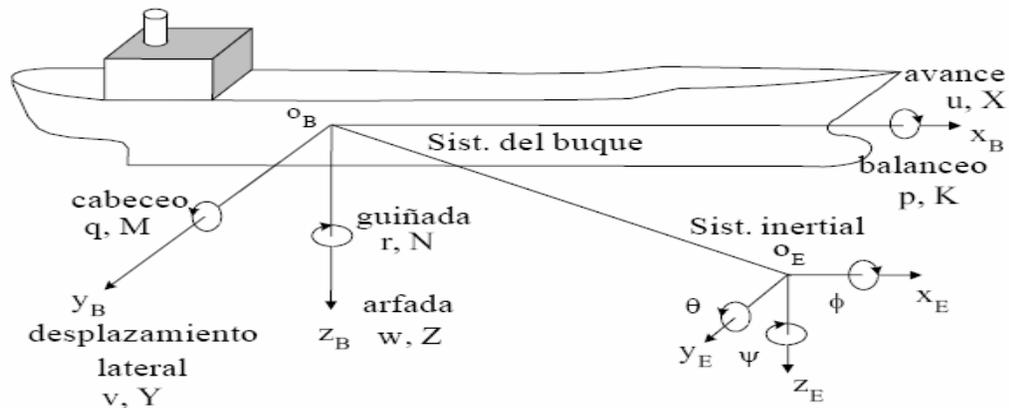
Tabla 3: Nomenclatura utilizada para describir el movimiento del barco.

TRASLACIÓN	FUERZA	VELOCIDAD LINEAL	POSICIÓN
Avance	X	U	x
Desplazamiento lateral	Y	V	y
Arfada	Z	W	z
Rotación	Momento	Velocidad Angular	Angulo
Balanceo	K	P	ϕ
Cabeceo	M	Q	θ
Guiñada	N	R	ψ

FUENTE: CHAVES, Jeremías, *Aplicaciones de Control en Barcos. Monografía. Ingeniero Eléctrico. Universidad de Costa Rica. Facultad de ingeniería. Departamento de Automatica,2005 p.5*

En la figura 12 se realiza la representación de los sistemas de coordenadas y la definición de los movimientos de traslación y rotación del buque.⁵⁷

Figura 12: Sistema de Coordenadas con la Definición de Ángulos y Velocidades



FUENTE: CHAVES, Jeremías, *Aplicaciones de Control en Barcos. Monografía. Ingeniero Eléctrico. Universidad de Costa Rica. Facultad de ingeniería. Departamento de Automatica,2005.p.5.*

El centro de gravedad (CG) de un buque varía dependiendo de las condiciones de la carga, por esto no se hace coincidir este punto con el origen del sistema de coordenadas del buque, ya que esto sería útil si el centro de gravedad existiese en

⁵⁷ Ibid., p. 5.

el plano principal de simetría. Una opción para reducir la complejidad de las ecuaciones, consiste en hacer la elección de un sistema de coordenadas ortogonal que se situaría paralelamente a los ejes principales de inercia⁵⁸.

Se tiene que relacionar de acuerdo al sistema de coordenadas del buque, las velocidades lineales y angulares, las fuerzas y los momentos. Para realizar la representación de la posición y orientación se debe utilizar un sistema inercial de referencia llamado sistema general, de tal forma que el vector velocidad respecto al sistema de coordenadas queda definido en la ecuación 7⁵⁹

$$v = [v1^T, v2^T]^T \quad \text{con } v1 = [u, v, w]^T \text{ y } v2 = [p, q, r]^T \quad (7)^{60}$$

El vector posición y orientación respecto al sistema inercial de referencia por la ecuación 8:

$$n = [n1^T, n2^T]^T \quad \text{con } n1 = [x, y, z]^T \text{ y } n2 = [\phi, \theta, \psi]^T \quad (8)^{61}$$

Para describir la trayectoria del buque se realiza la derivada del vector de posición y orientación \dot{n} , el vector se relaciona geoméricamente con el vector velocidad v por la siguiente ecuación 9:⁶²

$$\dot{n}: J(n2)v \quad (9)^{63}$$

Donde $J(n2)$ es una matriz de transformación que depende de los ángulos de Euler.

Las ecuaciones del movimiento del buque con relación al sistema de coordenadas de O_B partiendo de las ecuaciones de newton se pueden expresar de forma vectorial como en la ecuación 10 y 11.⁶⁴

$$MRV\dot{v} + CRB^{(v)v} = TRB \quad (10)^{65}$$

$$\dot{n}: J(n2)v \quad (11)^{66}$$

- M_{RB} =matriz de masa inercia.
- C_{RB} = matriz centrípeta y de Coriolis.

⁵⁸ Ibid., p. 5.

⁵⁹ Ibid., p. 6.

⁶⁰ Ibid., p. 6.

⁶¹ Ibid., p. 6.

⁶² Ibid., p. 6.

⁶³ Ibid., p. 6.

⁶⁴ Ibid., p. 6.

⁶⁵ Ibid., p. 6.

⁶⁶ Ibid., p. 6.

- T_{RB} = vector generalizado de fuerzas y momento.

T_{RB} es producido por el movimiento del casco en el agua, debido a la superficie de control (timones, aletas, etc.), las generadas por los sistemas de propulsión y debido a perturbaciones ambientales (olas, viento y corrientes).⁶⁷

6.8.2 ECUACIONES DINÁMICAS CON 3 GRADOS DE LIBERTAD

La representación del movimiento de un buque en el plano horizontal se utilizan dos modelos con tres grados de libertad, este modelo solamente utiliza los movimientos de avance, guiñada y desplazamiento lateral. Los movimientos restantes como balanceo, cabeceo y arfada son despreciables, situando el sistema de coordenadas O_B del buque con los ejes principales de inercia, la ecuación (4) se reduce a la ecuación matricial (12-15)⁶⁸ :

$$M_{RB(3x3)} \dot{v} + C_{RB(3x3)}(v) v = t_{RB(3x1)} \quad (12)^{69}$$

Donde,

$$M_{RB(3x3)} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_G \\ 0 & mx_G & I_z \end{bmatrix} \quad (13)^{70}$$

$$C_{RB(3x3)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & mu \\ m(x_G r + v) & -mu & 0 \end{bmatrix} \quad (14)^{71}$$

$$t_{RB(3x1)} = [X, Y, N]^2 \quad (15)^{72}$$

Que se suelen representar de forma compacta como:

- Avance: $m(u - v\dot{r} - x_G r^2) = X$
- Desplazamiento lateral: $m(\dot{v} - ur + x_G \dot{r}) = Y$
- Guiñada: $I_2 \dot{r} + mx_G (ur + \dot{v}) = N$

⁶⁷ Ibid., p. 6.

⁶⁸ Ibid., p. 6.

⁶⁹ Ibid., p. 6.

⁷⁰ Ibid., p. 7.

⁷¹ Ibid., p. 7.

⁷² Ibid., p. 7.

7. MISIÓN ACADÉMICA

La misión académica desarrollada en el canal de Panamá, fue fundamental para recopilar la información necesaria y conocer de primera mano su desarrollo e implementación a lo largo de estos años, allí se pudo evidenciar la problemática que se presenta con el choque de los buques y las paredes de las esclusas, situación que permitió el desarrollo del presente trabajo de grado, pues con ello se pensó implementar un modelo que permita darle solución; además de ello se conocieron todas las medidas de seguridad que se implementaron con su funcionamiento, las cuales pueden ser mejoradas y con ello lograr un óptimo funcionamiento del mismo.

El recorrido que se realizó, consistió en visitar las esclusas de Miraflores las cuales hacen parte de la primera fase del canal de Panamá, construido hace más de 100 años, allí se evidenció que la ingeniería que se utilizó, para la construcción de esas esclusas, en su época, era ingeniería de punta y su construcción fue pensada de tal magnitud que se llegó a pensar que podía ser imposible, sin embargo su desarrollo demostró ser todo lo contrario, convirtiéndose en una de las obras de ingeniería más grandes del mundo, no solo por lo que tuvo que ver con su desarrollo, sino también por el avance que permite el paso de buques de diferentes tamaños, pesos y dimensiones de un océano al otro, acortando distancias de comunicación entre países.

El mantenimiento del canal de Panamá es una parte importante para que su operación siga por muchos años más, en la visita se pudo observar cómo funciona su mantenimiento, pues en el momento del recorrido estaban trabajando en las compuertas de las esclusas y fue interesante conocer de primera mano cómo lo realizan, puesto que para este tipo de mantenimientos, es necesario parar la operación de uno de los carriles de las esclusas, pues se tiene que realizar el desmonte una de las compuertas, el cual se realiza por medio de una grúa flotante, la cual fue construida a principios de la segunda guerra mundial con ingeniería Alemana nazi de más de 112 metros de altura y con un peso promedio de 5000 toneladas.

En la figura 13 se observa el procedimiento que se realiza para realizar el mantenimiento de uno de los carriles de las esclusas de Miraflores.

Figura 13: Esclusas de Miraflores en mantenimiento



Fuente: Elaboración Propia.

Otra de las maquinas observadas en el funcionamiento del canal, corresponde a las locomotoras remolcadoras, que permiten tener un control total de los barcos a su paso por el canal como se muestra en la figura 14, su función es remolcar los buques que van pasando sin que los estos golpeen las paredes de las esclusas, las locomotoras están montadas sobre unos rieles a lado y lado de las esclusas, por medio de unos cables acerados en donde se amarra el buque a estas por cada lado, adelante y atrás, cada locomotora es operada por un operario que tendrá comunicación constante con los demás operarios para la coordinación del paso de los buques.

Figura 14: Paso de Buque por esclusas de Miraflores remolcado por locomotoras

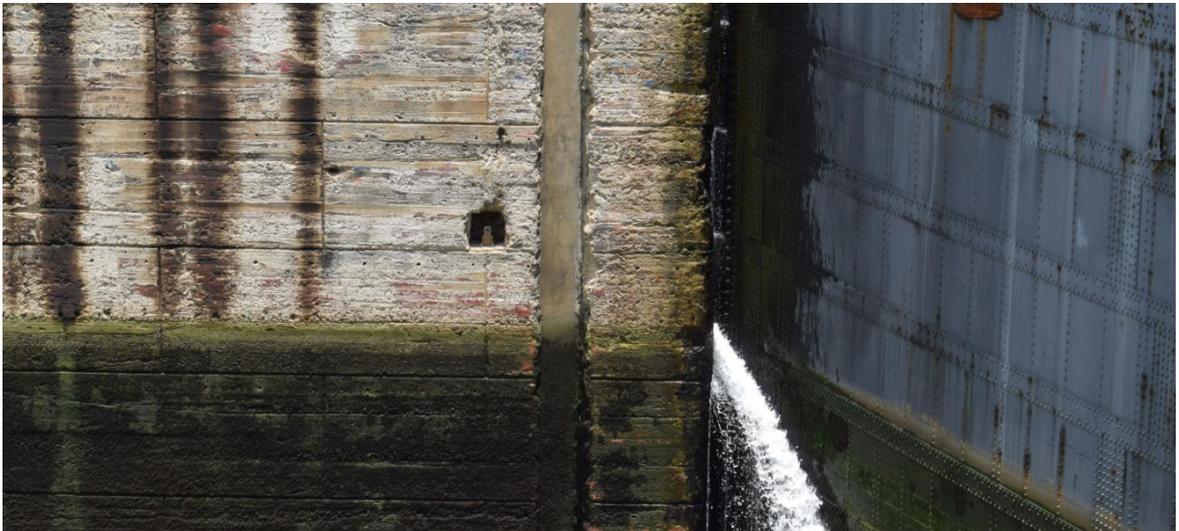


Fuente: Elaboración Propia.

Al tener acceso a la operación del canal, se pudo evidenciar que en las esclusas tienen instalados sensores en las paredes (figura 15), se encuentran ubicados en la parte inicial y final de cada sección de las esclusas y su función es poder identificar en que punto de la esclusa se encuentra el buque, estos sensores, según lo que indicó el ingeniero de operaciones son capaces de medir la distancia, sin embargo en estas esclusas no es indispensable tomar la medida de la distancia del buque con las paredes de las esclusas.

Adicionalmente cuando el buque se encuentra en el área de operación de las compuertas, se activa una alarma para que no se produzcan colisiones entre este y las compuertas.

Figura 15: Sensores de Posicionamiento instalados en las esclusas de Miraflores



Fuente: Elaboración Propia.

A pesar de tener tantos años de construcción, el canal de Panamá integra nuevas tecnologías para que sus operaciones con el paso del tiempo mejoren, en la torre de control de las esclusas de Miraflores, se guarda el sistema con el que en épocas pasadas se realizó el control de nivel, apertura y cierre de las compuertas (figura 16), este sistema funcionaba con mandos manuales e indicadores lumínicos que se encendían, cuando una compuerta se encontraba cerraba o abierta y también indicaban cuando había una falla en el sistema; este sistema funcionó muy bien, sin embargo el cambio de tecnología era necesario para un mejor control en el paso de los buques.

Figura 16: Sistema de control antiguo



Fuente: Elaboración Propia.

La torre de control del canal de Panamá, tiene una amplia gama de controladores que permiten que las operaciones se lleven de forma correcta y sin ningún contratiempo, desde la torre se tiene el control del tráfico marítimo que va circular por las esclusas, también se monitorean los sistemas eléctricos, electrónicos e hidráulicos como se ve en la figura 17 que permiten la operación del canal, todos estos sistemas son monitoreados constantemente por dos operadores, quienes son los responsables de que la operación del canal funcione sin ningún contratiempo, si llegase a presentarse algún inconveniente, se tienen protocolos para solucionarlos y evitar que la operación se detenga o se causen problemas mayores.

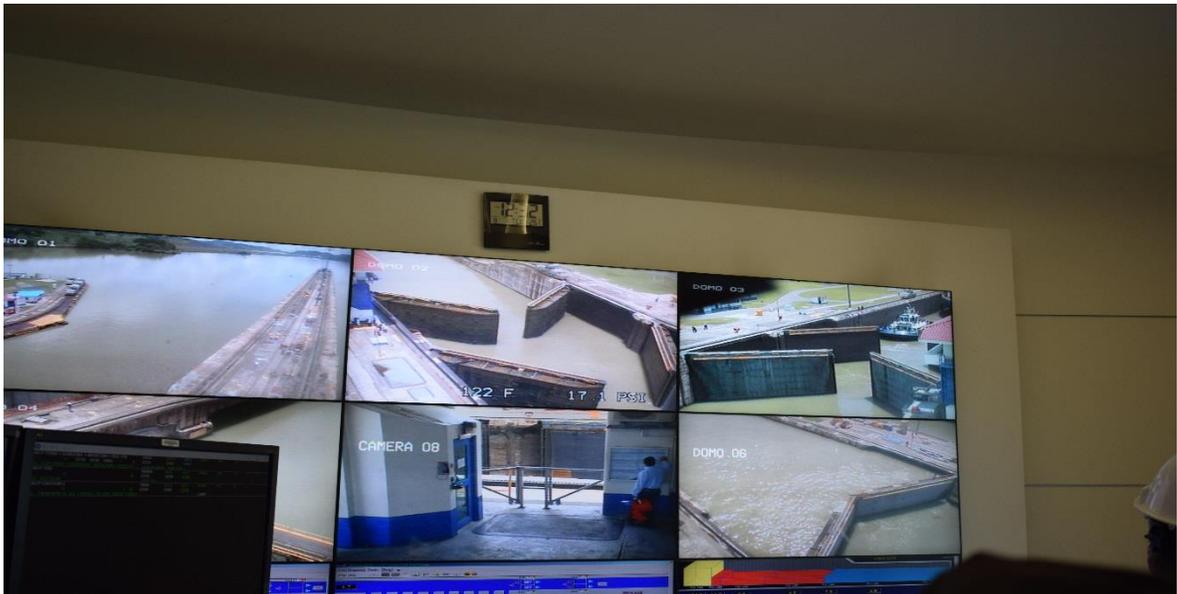
Figura 17: Pantallas programas de control



Fuente: Elaboración Propia.

Además de tener sistemas de monitoreo en la operación del canal, se usa un circuito de cámaras que permite observar en tiempo real la operación de esta figura 18, siendo esta implementación una ayuda adicional que permite tener un mejor control de los procesos, también sirve para observar que los operarios del canal estén cumpliendo con sus funciones y aporta una mayor seguridad para la corrección de malos procedimientos de estos, finalmente permite tener un control en el ingreso de personal no autorizado.

Figura 18: Monitoreo de esclusas con cámaras



Fuente: Elaboración Propia.

Otra parte del recorrido, correspondió a la visita de las nuevas esclusas del canal, llamadas esclusas de Cocolí, en el camino se pudieron aclarar muchas dudas que se tenían acerca del proyecto que se iba a desarrollar, una de ellas consistió en averiguar por qué no se utilizó un sistema como el de las locomotoras, para el guiado de los buques, la respuesta del ingeniero que dirigió la visita, fue que *“existían diferentes factores, uno era que al tener buques de mayor envergadura y altura se corría el riesgo que los buques por la fuerza levantaran las locomotoras y no cumplieran su función como lo hacen en el canal antiguo, otro, era que este sistema de locomotoras, requiere de un mayor mantenimiento que incrementa costos para garantizar su operación, razón por la cual, al evaluar el costo por el beneficio no justificaba montar un sistema igual”*.

En las esclusas de Cocolí, el sistema que se escogió para realizar el paso de los buques, consiste en un barco remolcador en proa, que es el que realiza el desplazamiento hacia adelante (figura 19) y en popa, va otro barco remolcador que da la dirección para evitar los choques (figura 20), todo el proceso de desplazamiento es guiado por un experto asignado por el canal, quien da

indicaciones a los capitanes de los buques de como maniobrar el mismo a su paso por el canal, cuando se va realizar el llenado de las esclusas, se amarran los barcos en proa y popa a las noray para que este no se mueva, cuando el nivel del agua en la esclusa sube.

Figura 19: Barco remolcador en proa en esclusas de Cocolí



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 20: Barco remolcador en popa en esclusas de Cocolí



Fuente: Elaboración Propia.

El amarre que se utiliza para que el barco no se mueva en la esclusa, es un método antiguo y expone a los operarios a que puedan ser víctimas de algún tipo de accidente, pues son estos los que manipulan directamente las cuerdas de amarre; este método se ha utilizado por muchos años en diferentes puertos y embarcaderos

para el amarre de buques, este, se realiza cuando el barco se encuentra dentro de la esclusa y listo para ser elevado, o cuando se va realizar el descenso, su finalidad es que el buque pueda resistir el movimiento al momento de realizar el llenado y vaciado, con la implementación de un método de posicionamiento del buque dentro del canal se mejorarían tiempos de paso del buque por el mismo y se garantizaría no tener que exponer la vida e integridad de los operarios.

Existen unas barreras de plástico (figura 21), que se encuentran instaladas para la protección de las paredes de las esclusas, pero estas sufren desgastes con el paso de los buques, algunas se desprenden por completo, dejando las paredes sin ninguna protección, puesto que las mismas no son remplazadas de forma inmediata, si por algún motivo se llegará a presentar el choque de un buque, en las paredes donde no se tiene protección, estas se afectarían directamente, ocasionando que se puedan presentar filtraciones de agua en la estructura afectando su estabilidad, originando un problema mayor.

Figura 21: Barreras Dañadas Utilizadas para Protección de Paredes de las Esclusas de Cocolí



Fuente: Elaboración Propia.

Se pudo evidenciar, que para mitigar el problema y como solución temporal, se están colocando protecciones de mayor resistencia (figura 22), sin embargo al ser de mayor resistencia su grosor es más grande y esto hace que el espacio dentro de la esclusa disminuya, hasta el momento el buque de mayor dimensión que ha cruzado el canal ampliado, ha sido el denominado "OOCI FRANCE" con 366,47 metros de eslora y 48,23 metros de manga, dejando un espacio de 6,73 metros de espacio entre este y las paredes de la esclusa, quedando con esto demostrado que no se aprovecharía el espacio total al interior de la esclusa y, si un buque de mayores dimensiones quisiera cruzar el canal, lo haría posiblemente con

restricciones o simplemente no podría hacerlo, quedando con ello evidenciado que es necesario implementar un sistema con el cual se aproveche un mayor espacio y se garantice más seguridad a los buques y a la infraestructura del canal.

Figura 22: Nuevo Sistema de Barreras Utilizado en Esclusas de Cocolí



Fuente: Elaboración Propia.

Fue importante conocer, el tipo de sensores que fueron implementados en las esclusas de Cocolí para el desarrollo de su operación, se verificó que al igual que en las esclusas antiguas, se utilizan sensores de detección (figura 23), que sirven para monitorear cuando el buque se encuentre en el área de operación de compuertas y así evitar accidentes.

Figura 23: Sensor de presencia instalado en las esclusas de Cocolí



Fuente: Elaboración Propia.

También se encontró que utilizan sensores de nivel los cuales se encuentran ubicados al interior de las esclusas en el mar y en el lago, los sensores de nivel, permiten que cada una de las cámaras, para cuando se abran las compuertas, tenga el nivel de agua adecuado, garantizando que el paso del buque se realice en debida forma y sin tropiezos; es importante mantener el nivel del mar monitoreado, toda vez, que del lado del mar pacifico la marea varia hasta 10 pies, esta variación puede afectar el paso de buques de grandes dimensiones, pues estos al tener un calado mayor, corren el riesgo de quedar encallados dada la baja marea, los controladores del tráfico marítimo son los encargados de monitorear constantemente el nivel y son responsables de informar a los buques si es adecuado que pasen o esperen la subida de la marea.

Se tienen instalados sensores ambientales integrados en una sola unidad, las cuales permiten medir magnitudes como temperatura, salinidad, estado del aire y lo que se refiere con agentes contaminantes, pues es importante conservarlo en las mejores condiciones que sea posible y así se va a mitigar cualquier impacto que de estos fenómenos se pueda originar, además, el sistema también vigila la dirección y velocidad del viento, dado que cuando no hay condiciones óptimas de vientos, se podría parar la operación para evitar cualquier tipo de accidente dentro del canal.

Con la ampliación del canal de Panamá, se tuvo en cuenta desde la planificación del proyecto, el ahorro de agua, razón por la cual, las tinas construidas para la reutilización de agua (figura 24), ahorran hasta un 60% que se requiere para el esclusaje de los buques, estas tinas, fueron construidas a un costado de las cámaras de las esclusas, cada sección de las esclusas tiene 3 tinas de reutilización de agua, el llenado y vaciado de las esclusas de la ampliación, al igual que las esclusas antiguas, se realiza por medios de gravedad y se controla por una serie de válvulas que se activan según corresponda.

Figura 24: Tinias ahorradoras de agua de esclusas de Cocolí



Fuente: Elaboración Propia.

Una de las válvulas identificadas, corresponde a la de las alcantarillas, que son las de mayores dimensiones y en total hay 32 instaladas (ver figura 25). También se encuentran las válvulas de conductos que controlan el paso de agua entre las tinajas y las cámaras de las esclusas, en total se instalaron 36, de igual forma se instalaron válvulas para controlar el paso de agua entre las secciones de las esclusas, estas válvulas son llamadas válvulas de ecualización y en total se instalaron 8 válvulas.

Figura 25: Válvulas de esclusas de Cocolí



Fuente: Elaboración Propia.

Para el accionamiento de las válvulas, se utiliza un sistema de potencia (ver figura 26), este sistema está compuesto de motores que controlan un cilindro hidráulico, estos se encuentran ubicados en un cuarto donde está instalada toda una red eléctrica y componentes electrónicos que permiten tener mejor control del sistema, este sistema proporciona 100 HP a las válvulas de alcantarilla, 75 HP a las válvulas de conductos y 50 HP a las válvulas de ecualización.

Figura 26: Sistema de potencia para accionamiento de válvulas



Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, es importante mencionar, que la torre de control de las nuevas esclusas del canal de Panamá (ver figura 27), cumple la función más importante, la cual consiste, en el monitoreo en tiempo real de todos los sistemas, al igual que la torre de control de las antiguas esclusas, los sistemas son de última generación, permiten tener control del tráfico de buques, a través de los sensores de presencia, revisan en qué posición se encuentra el buque dentro de la esclusa, controlan los niveles de agua de éstas, monitorean los sistemas de control de maquinaria y el diagnóstico del estado de la misma, además de las fallas que se puedan presentar en todos los sistemas, finalmente el sistema de cámaras que complementa el sistema de monitoreo, permite que la operación del mismo se lleve a cabo en debida forma.

Figura 27: Torre de control de esclusas de Cocolí

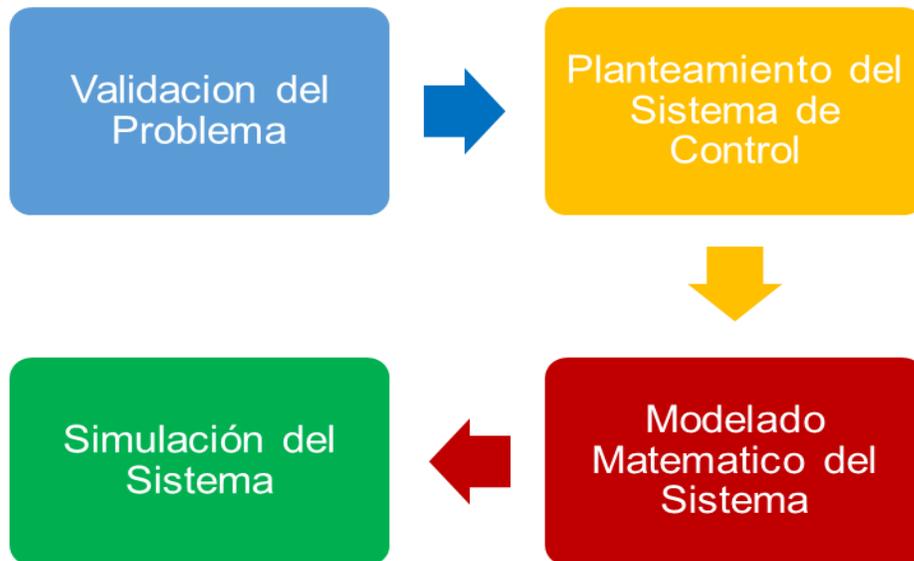


Fuente: Elaboración Propia.

8. METODOLOGÍA

En la figura 28, tenemos el Flujograma la cual muestra la metodología seguida para el desarrollo de este trabajo de grado. La descripción de cada fase se presenta a continuación.

Figura 28: Flujograma de metodología planteada



Fuente: Elaboración propia

8.1 VALIDACIÓN DEL PROBLEMA

Con la visita realizada a las esclusas de Cocolí, se evidenció el problema que éste tiene con los choques que se presentan entre los buques y las paredes de las esclusas. Una de sus soluciones provisionales, consistió en la instalación de protecciones de caucho, con el fin de mitigar el impacto, sin embargo, con el paso de los buques estas protecciones se deterioran y dejan desprotegidas las paredes ya que no son remplazadas de forma inmediata.

El encargado de dirigir el buque, dentro del canal de Panamá, es el piloto, quien es ayudado por un experto que hace parte del canal, éste, se ubica dentro del buque durante el tránsito por el canal. El experto proporciona información al piloto, para que este pueda realizar el tránsito al interior del canal sin ningún tipo de inconveniente, pero en ocasiones no se siguen las instrucciones adecuadamente y es allí cuando se presentan los choques.

El paso del buque tiene que ser coordinado, a su vez, con los barcos remolcadores que se encuentran en proa y en popa, a través de una sincronización, sin embargo, debido a factores externos, esta sincronización falla y nuevamente se presentan los choques.

8.2 PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control que se planteó, debe ser capaz de corregir la posición de los buques, cuando se detecte que estos, están en riesgo de chocar con las paredes de las esclusas, el sistema podrá controlar unos cilindros hidráulicos que estarán montados en rieles sobre la estructura del canal, se pensó, que debe ser montado en proa y popa y deberá colocarse a lado y lado de las paredes de las esclusas.

El control de distancia, se realizará por medio de sensores, las cuales si advierten algún cambio en la distancia, detendrá el desplazamiento del buque, para que éste pueda ser corregido por los actuadores, esto se realizará con el fin de obtener nuevamente una posición adecuada y que se pueda continuar con el desplazamiento, cuando se termine el traslado del buque del punto inicial al punto final, el sistema de desplazamiento volverá a un estado cero, para ponerse en marcha nuevamente con otro buque que vaya a iniciar su paso por el canal.

8.3 MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

En la búsqueda de información para la implementación del modelo, se encontró, que ya se han planteado modelos matemáticos para el gobierno de un buque, los cuales se han enfocado en seis grados de libertad. Para el caso particular, solo se tendrán en cuenta, tres grados de libertad, ya que se pueden utilizar para buques que operan en baja velocidad. El modelo aplicado es por tanto el de tres grados de libertad con posición dinámica.

Este mismo modelo matemático, se encuentra propuesto en un entorno de simulación llamado MSS (Marine Systems Simulator) que se ejecuta desde Matlab/Simulink 2017a, conformado desde un entorno de diagramas de bloque. El modelo, como ya se indicó se usa para buques de baja velocidad, los tres grados de libertad que operan en este sistema son avance, desplazamiento lateral y guiñada.

8.4 SIMULACION DEL SISTEMA

Se le realizó una simulación de lazo abierto y lazo cerrado. Con el sistema de control de lazo abierto, se verificó como actúa el buque libremente solo aplicando una fuerza (Y), con el control de lazo cerrado, lo que se obtuvo en realidad, es que si el buque sufre algún cambio de la posición de la componente (Y) al aplicar una fuerza,

este retorne a su posición inicial en el eje (Y). Como la componente de posición retorna a (0) en determinado tiempo también la componente (Y) de velocidad se acerque a (0).

Estos movimientos tienen componentes en fuerza, posición y velocidad. El sistema que se empleó en Simulink, tiene una entrada y dos salidas, estas hacen referencia a vectores. La entrada de este, son las componentes de fuerzas que se nombraran como el vector "tau", mientras que las salidas, son la componente de posición que será el vector "eta", y el vector de salida "nu" nos indica las posiciones.

9. DESCRIPCION DE LOS ELEMENTOS

El trabajo de grado tiene como enfoque principal la realización de la simulación, de la posible solución al problema que se planteó, para ello, se usó la herramienta de software Matlab/Simulink y una librería que se enfoca directamente a los modelos matemáticos para el gobierno de un buque.

9.1 MATLAB

En un entorno de cálculo técnico de altas prestaciones, para el cálculo numérico y la visualización, se integra:

- Análisis numérico.
- Cálculo matricial.
- Procesamiento de señales.
- Gráficos.

En un entorno fácil de usar, en donde los problemas y las soluciones son expresados como se escriben matemáticamente, sin la programación tradicional.

El nombre Matlab proviene de "Matrix Laboratory" (Laboratorio de Matrices); fue escrito originalmente para proporcionar un acceso sencillo al software matricial, desarrollado por los proyectos LINPACK y EISPACK, que juntos representan lo más avanzado en programas de cálculo matricial.

Es un sistema interactivo cuyo elemento básico de datos es una matriz que no requiere dimensionamiento, esto permite resolver muchos problemas numéricos en una fracción del tiempo, que llevaría hacerlo en lenguajes como C, BASIC o FORTRAN ⁷³.

Ha evolucionado en los últimos años, a partir de la colaboración de muchos usuarios. En entornos universitarios, se ha convertido en la herramienta de enseñanza estándar para cursos de introducción en álgebra lineal aplicada, así como cursos avanzados en otras áreas. En la industria, se utiliza en la investigación y para resolver problemas prácticos de ingeniería y matemáticas, con un gran énfasis en aplicaciones de control y procesamiento de señales.

También, proporciona una serie de soluciones específicas denominadas "Toolboxes", estas son muy importantes para la mayoría de sus usuarios y son

⁷³ RODRIGUEZ, Casiano. Introducción a Matlab [en línea]. Bogotá: Universidad de Laguna [citado 23 de octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL> <http://nereida.deioc.ull.es/~pcgull/ihiu01/cdrom/matlab/contenido/node2.html>

conjuntos de funciones Matlab que extienden el entorno para resolver clases particulares de problemas como:

- Procesamiento de señales
- Diseño de sistemas de control
- Simulación de sistemas dinámicos
- Identificación de sistemas
- Redes neuronales y otros.

Probablemente su característica más importante, es la capacidad de crecimiento, que permite convertir al usuario en un autor contribuyente, creando sus propias aplicaciones.

Finalmente, se puede concluir, que sus prestaciones más importantes son:

- Escritura del programa en lenguaje matemático.
- Implementación de las matrices como elemento básico del lenguaje, lo que permite una gran reducción del código, al no necesitar implementar el cálculo matricial.
- Implementación de aritmética compleja.
- Un gran contenido de órdenes específicas, agrupadas en TOOLBOXES.
- Posibilidad de ampliar y adaptar el lenguaje, mediante ficheros de script y funciones⁷⁴.

9.2 MSS GNC

Bibliotecas básicas y ejemplos de sistemas para guía, navegación y control (GNC).

La biblioteca contiene:

- Funciones de archivos (ext.M) (cinemática y cinética) y ejemplos de Simulink para aplicaciones GNC en el dominio del tiempo.
- Biblioteca de archivos (ext. .M) con modelos de recipientes, ensayos de maniobras y simulación dinámica.
- Archivos (ext. .M) editables por el usuario para simulación y control de barcos, plataformas y vehículos submarinos.
- Caja de herramientas Simulink para la simulación dinámica de buques y sistemas de control. La biblioteca de Simulink incluye modelos de embarcaciones, pilotos automáticos, sistemas de control DP (Posición dinámica), filtros de olas, sistemas de guía, modelos de actuadores y mucho más.

⁷⁴ *Ibíd.*, p. 4.

9.3 MSS HYDRO

Caja de herramientas, que lee los archivos de datos de salida, generados por los programas hidrodinámicos y procesa los datos para su uso en Matlab / Simulink.

Incluye varios recipientes de ejemplo, para construir su propio modelo, necesita una licencia para uno de los siguientes programas:

- Programas de teoría de tira 2D - ShipX (Veres) por MARINTEK AS
- Programas de teoría de potencial 3D - WAMIT by WAMIT Inc.

Los datos procesados se pueden usar en simulación en tiempo real de embarcaciones marinas en 6 DOF expuestos a cargas de onda de primer y segundo orden (funciones de transferencia RAO de movimiento y fuerza).

9.4 CAJA DE HERRAMIENTAS FDI DE MSS

Esta es una caja de herramientas independiente para la identificación de modelos de fuerza de radiación y efectos de memoria de fluidos de estructuras marinas (embarcaciones marinas y convertidores de energía de las olas).

10. DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO

Con la visita técnica Internacional que se realizó a la ampliación del canal de Panamá, con el objetivo de conocer la realidad de la operación de este, se confirmó que efectivamente el choque entre los buques y las paredes del canal es una realidad y un problema que ya se había identificado antes de la visita; con ello se pudo definir el planteamiento de una solución a este inconveniente a través de un sistema de cilindros hidráulicos que le proporcionen un guiado al buque a su paso por el canal, muy similar a las locomotoras que trabajan en el antiguo canal.

La solución propuesta mediante cilindros hidráulicos requiere el uso de sensores de distancia para tomar una constante medición, desde la pared de la esclusa hasta el buque, con el fin de que la distancia entre el buque y la pared sea siempre misma en su recorrido por el canal, de no ser así, a través de los cilindros se va a corregir la posición del buque para evitar que se pueda presentar algún choque entre este y la pared de la esclusa. Se instalarían cuatro cilindros, dos al lado derecho y dos al izquierdo como se muestra en la figura 29.

Figura 29: Render vista superior recorrido del buque dentro del canal, guiado por los cilindros



Fuente: Elaboración propia.

Como el objetivo es garantizar que el buque se encuentre centrado, cuando se encuentre transitando al interior del canal, cuando esto no ocurra por algún tipo de desviación, los cilindros instalados se accionarían y agarrarían al buque ejerciendo una fuerza contraria, para que éste no se acerque a las paredes y mantenga las mismas

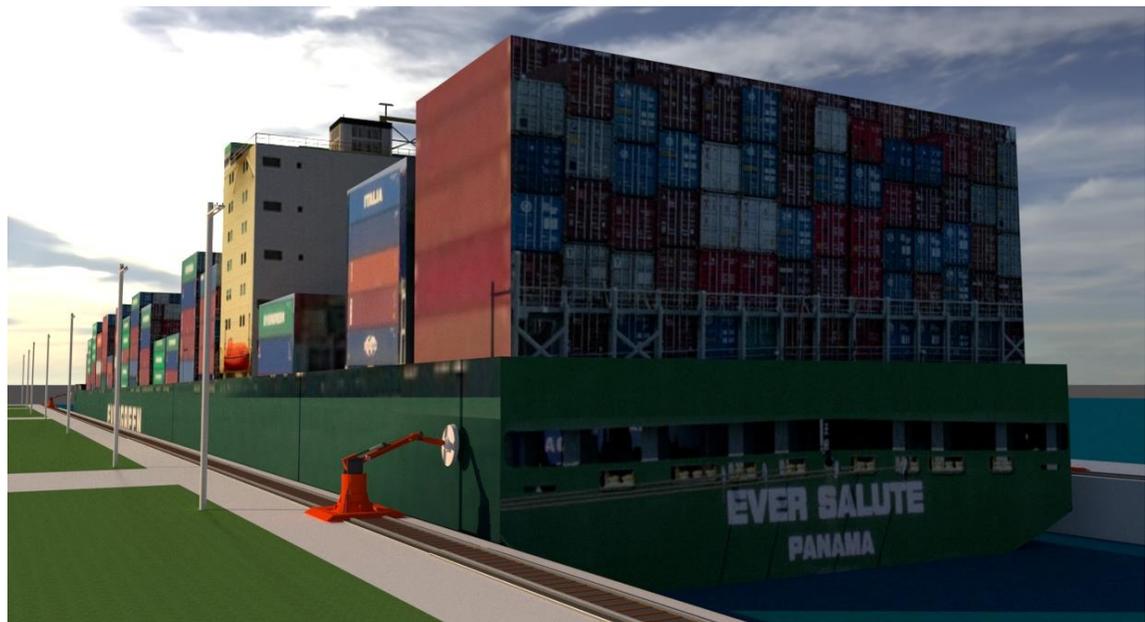
distancias la figura 30 y 31 da una perspectiva de cómo quedaría el sistema de control montado en el canal de Panamá.

Figura 30: Render de cilindro ubicado en la proa del buque, previo iniciar recorrido



Fuente: Elaboración propia

Figura 31: Render de cilindro ubicado en la popa del buque, finalizando recorrido



Fuente: Elaboración propia

Los cilindros están fijados a un sistema de rieles como se muestra en la figura 32, su desplazamiento será impuesto por la misma propulsión del buque, ya que éstos, solo se encargarán de encaminar el buque dentro de su desplazamiento al interior del canal.

Figura 32: Render de prototipo de cilindro a instalar



Fuente: Elaboración propia

11. IMPLEMENTACIÓN

Una vez propuesta la solución para el problema en cuestión se lleva a cabo la simulación de la misma. Para ello fue necesario modelar el sistema completo (buque-cilindros) y diseñar un sistema de control. A continuación, se describen estos procedimientos.

11.1 MODELADO DEL BUQUE

Para el diseño de un sistema de control, que permita tener acceso a la posición de un buque, a través de cilindros hidráulicos, se realizó una investigación sobre los modelos matemáticos para el gobierno de un buque. En este trabajo de grado, se encontraron varios modelos matemáticos, pero en particular llamó la atención, un modelo que se refiere a los tres grados de libertad del buque de posición dinámica, que son utilizados para el gobierno de un buque, cuando a este se le está haciendo mantenimiento, o está realizando el recorrido a bajas velocidades, este modelo se puede emplear para buques que se estén desplazando con una velocidad menor o igual de 2m/s, razón por la cual este factor fue viable, para ejecutar este tipo de modelo en el desplazamiento de buques al interior del canal.

En este modelo matemático, solo se tienen en cuenta dos movimientos en traslación, los cuales son avance y avance desplazamiento lateral, y en rotación el movimiento de guiñada los cuales se pueden identificar en la figura 12.

Los demás movimientos, son despreciables, debido a que, para este modelo de baja velocidad, el buque no sufre mayor alteración como ya se mencionó antes, en la figura 12 previamente analizada se encuentra el respectivo movimiento, con su respectiva componente en fuerza y velocidad. Para este modelo de 3 DOF (DP), solo se tomará en cuenta la fuerza X, Y , N.

Este modelo, principalmente, consiste en obtener la velocidad y posición del buque mediante de ciertos cálculos matemáticos que se detallaran brevemente, en los cuales se tiene que tener en cuenta, los sistemas de posicionamiento dinámico (DP), su funcionamiento empieza por el conocimiento de los seis movimientos que tiene el buque, tres en traslación y tres en rotación, de estos movimientos, se da inicio al funcionamiento o la teoría de los sistemas de posición dinámico, el objetivo es mantener el buque en una posición fija, se dotará a este, de un sistema de propulsores, hélices y timones, que mediante componentes y sensores de movimiento, viento y corriente, transmitirán la señal de las fuerzas externas del buque, a un sistema informático, que traducirá estos datos en fuerzas de empuje individuales para cada uno de los propulsores y, así, contrarrestarlas, pudiendo mantener el buque en la posición deseada.

Para la resolución del problema planteado, se utilizó un modelo DP con tres grados de libertad, se presenta un breve recuento del modelo matemático, para ver claramente el desarrollo de este, y se ilustraran las ecuaciones (Véase ecuaciones 17 - 20) cinemáticas y cinéticas del movimiento de un cuerpo con tres grados de libertad.

Las ecuaciones cinemáticas del movimiento (Ver ecuación 17, 18) para el posicionamiento dinámico, sólo consideran el movimiento en el plano horizontal. La $\eta = [x \ y \ \psi]^T$ da la posición (x,y) y el rumbo ψ del barco en la zona de referencia inercial, la velocidad en la zona de referencia inercial vendrá descrita como $V = [u \ v \ r]^T$.

Las ecuaciones dinámicas en forma vectorial se ilustran de la siguiente forma:

$$\dot{\eta} = R(\psi)v \quad (17)$$

Pero si cambia a modo de matriz se obtendrá:

$$J(\eta) = J(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Para los buques convencionales, es una suposición adecuada, decir que el cabeceo y los movimientos de balanceo son oscilatorios con una media de cero y una amplitud limitada. Esto también, tiene que ver con la estabilidad metacéntrica en la que existen momentos de restauración de dichas direcciones de cabeceo y balanceo. Por ello, solo la matriz de rotación de guiñada es la que se utiliza para describir la ecuación cinemática del movimiento.

Las ecuaciones cinéticas del movimiento no lineal (véase ecuación 19, 20) para un buque, con tres grados de libertad, se obtienen mediante la mecánica Lagrangiana y la mecánica Newtoniana o mecánica vectorial, cuya teoría, aunque es muy generalizable, desarrolla su formulación básica en los sistemas de referencia inerciales donde las ecuaciones básicas de movimiento se reducen a las leyes de Newton.

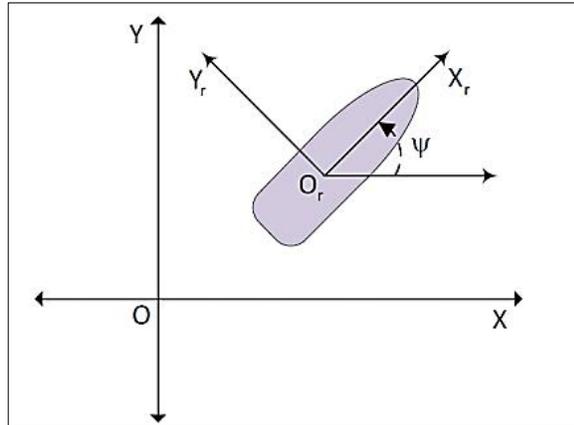
La forma vectorial de ver las ecuaciones de movimiento cinético es:

$$M\dot{u} + D = \tau + J^T(\eta)b \quad (19)$$

$$\tau = B_u u \quad (20)$$

En la figura 33 se puede observar cómo actúa un buque desde un punto de referencia con una posición fija respecto a la tierra, en los cuales se ilustra el estado del buque en los ejes (x,y).

Figura 33: Buque en eje X y eje Y



Fuente: ZAMORA, Pablo. *Posicionamiento dinámico: principios, características y operaciones*. [en línea]. Bogotá: Universidad de Cantabria [citado 23 de octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL><https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/6290/Pablo%20Tom%C3%A1s%20Zamora%20Sarabia.pdf?sequence=1>

De la ecuación 20, se puede deducir que el vector (τ) representa el control de las fuerzas y el momento actuando sobre el barco en un punto fijo dentro del cuadro de referencia todo esto proporcionado por el sistema de propulsión del barco. El vector u describe el control de entradas y es el comando para los actuadores que se supone que tienen mucha más velocidad de respuesta dinámica que la que pueda tener el barco.

El vector B_u representa la asignación del comando del actuador a la fuerza generada por los actuadores. Para sistemas de Posicionamiento Dinámico, la matriz de inercia se describe en la siguiente ecuación 21:

$$M = \begin{bmatrix} m - X\dot{u} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y\dot{u} & mxg - Yr \\ 0 & mxg - Yr & Iz - Nr \end{bmatrix} \quad (21)$$

Donde la m es la masa que tiene el barco, I_z es el momento de inercia sobre el barco fijo en el eje Z, y el X_G es la posición longitudinal del centro de gravedad del barco con relación al sistema relativo de referencia.

Las masas que se han de añadir debido a los movimientos de aceleración del cabeceo, balanceo y guiñada vienen definidas en la ecuación 22. por:

$$X_{\dot{u}} \triangleq \frac{dX}{d\dot{u}}; Y_{\dot{v}} \triangleq \frac{dY}{d\dot{v}}, N_{\dot{r}} \triangleq \frac{dN}{d\dot{r}}, Y_{\dot{r}} \triangleq \frac{dY}{d\dot{r}}, N_{\dot{v}} \triangleq \frac{dN}{d\dot{v}} \quad (22)$$

Gracias a la simetría entre estribor y babor del barco, la masa añadida anteriormente del balanceo debido a las aceleraciones angulares en la guiñada, es igual a las masas añadidas de la guiñada debida a la aceleración del balanceo, es decir, $Y_{\dot{r}} = N_{\dot{v}}$. Por lo tanto, en aplicaciones de Posicionamiento Dinámico, asumiremos que la matriz M es simétrica y tendrá que ser estrictamente de valor positivo.⁷⁵

El movimiento del barco va a generar olas, lo que significa energía transmitida del barco a al agua y cuya energía está encuadrada en el término de amortiguación lineal cuya matriz D se la define como (ver ecuación 23)⁷⁶:

$$D = \begin{pmatrix} -Xu & 0 & 0 \\ 0 & -Yv & -Yr \\ 0 & -Nv & -Nr \end{pmatrix} \quad (23)$$

En la mayoría de los casos en posicionamiento dinámico, dicha matriz se asumió que es real, que no es simétrica y que es positiva. Esto no será siempre, ya que, para bajas velocidades, asumiremos que $Nv = Yr$ y en este caso diremos que dicha matriz es real, será simétrica y positiva⁷⁷.

Con esta explicación, sobre las partes del modelo de posición dinámica de un buque, se realizó una simulación para esta situación, que se planteó con la corrección de la posición en el eje y el paso de un buque dentro del canal, se limitó la información que se obtuvo de los parámetros de un buque, para la aplicación de este modelo DP, por lo cual se tomó como base un modelo que se planteó desde la herramienta en la cual se simuló.

La herramienta es Matlab/Simulink 2017a, esta ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables para modelar y simular sistemas dinámicos. Se integró con MATLAB, lo que permitió incorporar algoritmos de MATLAB en los modelos, y exportar los resultados de la simulación a MATLAB para llevar a cabo más análisis

⁷⁵ ZAMORA, Pablo. Posicionamiento dinámico: principios, características y operaciones. [en línea]. Bogotá: Universidad de Cantabria [citado 23 de octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL><https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/6290/Pablo%20Tom%C3%A1s%20Zamora%20Sarabia.pdf?sequence=1> >

⁷⁶ *Ibíd.*

⁷⁷ *Ibíd.*

Simulink funciona mediante bibliotecas de bloques, para este caso se descargó e instaló MSS, que es un simulador de sistemas marinos, el cual incluye algunos modelos de barcos, vehículos submarinos y estructuras flotantes.

Esta MSS trae en si dos grandes bibliotecas una de estas es MSS GNC que puede simular el guiado, navegación y control para una simulación en tiempo real, esta es la biblioteca que se utilizó para simular la situación presentada dentro los objetivos de este documento, que es el control de posición de un buque dentro de canal de Panamá.

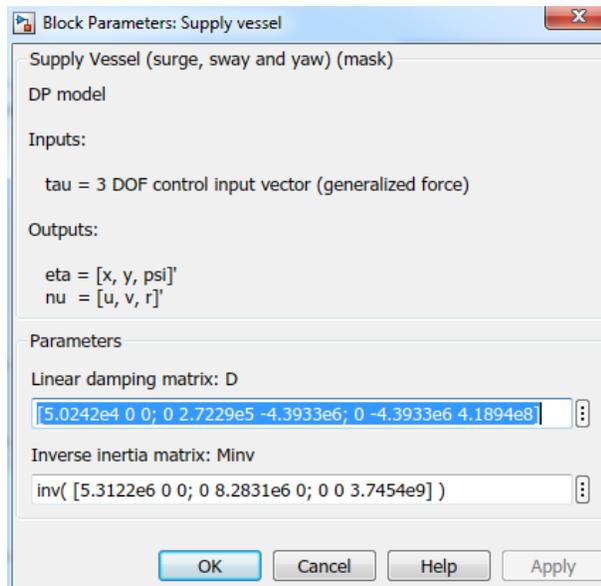
La otra biblioteca es (Toolkit - MSS HYDRO) que proporciona una interfaz que comúnmente utiliza códigos hidrodinámicos. Estos códigos son ampliamente utilizados por los arquitectos navales durante las etapas preliminares de diseño del barco, y proporcionó la mayoría de los parámetros necesarios para implementar un modelo de un sistema marino que podría usarse como un paso inicial en el sistema de control proceso de diseño.

Esta librería es una herramienta libre, la cual se instaló en Matlab 2017a, al momento de abrir estas librerías se encontró en la librería MSS GNC en sus ejemplos un modelo para buques de baja velocidad, que es lo que se quiso controlar dentro del canal, este ejemplo está basado o construido en el modelo de posición dinámica con tres grados de libertad.

En el ejemplo de la figura 34 que se tiene que aplicar un vector “tau” que está conformado por las fuerzas de avance, desplazamiento lateral y guiñada. en las salidas se obtendrán dos vectores “eta” y “un”. en la salida “eta” es un vector en el que se puede obtener las componentes de las velocidades para las fuerzas y el vector “un” está conformado por las componentes de posición de las componentes de fuerza. Se puede evidenciar a continuación aplicando el vector de fuerzas.

El modelo encontrado en Matlab es el siguiente (véase en la figura 35), se realizó una simulación para entender básicamente el modelo DP en tres grados de libertad.

Figura 34: Descripción de parámetros del bloque Supply Vessel de la librería MSS GNC de Matlab



Fuente: Matlab 2017a.

En la figura 34 se muestra la ventana de Matlab, en donde para poder realizar la simulación entre estos parámetros se introducen y se encuentra el vector de entrada tau, los vectores de salida “eta” y “nu”. Los parámetros para ejecutar la simulación y realizar el modelo matemático dentro de los bloques de Simulink.

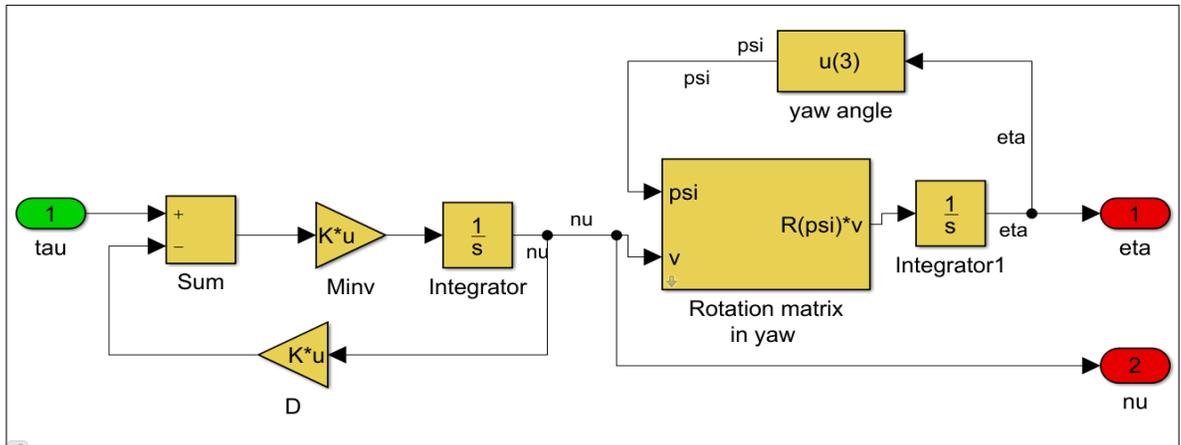
El ejemplo para el modelo de tres grados de libertad, está conformado por diagramas de bloques, que con su unión simulan el modelo matemático de tres grados de libertad de posición dinámica. Los bloques que se encuentra dentro del ejemplo que se va a manipular, se observa a continuación en la siguiente figura 35.

Figura 35: Estructura del modelo

a) Bloque Supply Vessel



b) Modelo interno del bloque Supply Vessel



Fuente: Matlab 2017^a

Este modelo (Véase figura 35b), lo que indica es la implementación de las ecuaciones matriciales del modelo tres grados de libertad con posición dinámica (véase ecuaciones 17 - 23), realiza la obtención de los vectores “eta” y “nu”, respecto al vector tau aplicando las ecuaciones de cinética y cinemática del modelo DP.

En este modelo bloques propuesto (ver figura 35.b), que corresponde al de tres grados de libertad de posición dinámica, en donde a simple vista se puede ver el vector de entrada ya se sabe que este vector está compuesto por las fuerzas de avance, desplazamiento lateral y guiñada. A la salida se obtiene las componentes de estas fuerzas en avance, desplazamiento lateral y guiñada.

Se observa que este modelo tiene como base, las ecuaciones de cinética y cinemática de un cuerpo, con estas ecuaciones se pueden representar en forma vectorial y matrices, este modelo involucra la matriz que se obtuvo de la cinemática y la cual se conoce como matriz de rotación. Las matrices que producen las ecuaciones de cinética son la matriz de inercia y de amortiguación.

Estas matrices se utilizan en el modelo de diagrama de bloques, una breve descripción de los bloques, es la entrada del vector de fuerzas, el cual se opera con una realimentación negativa, que entra a una ganancia de la matriz de inercia inversa.

Esta matriz contiene los parámetros que tiene el ejemplo Supply vessel como también la matriz de amortiguación. Después que se opera el vector tau con la matriz de inercia inversa, se integra, ya que se obtiene es aceleración al aplicar la matriz, donde después de integrarse, se obtienen velocidades como se observa en el diagrama de bloques, desde este punto se obtiene el vector un que está conformado por las velocidades de avance, desplazamiento lateral y guiñada $nu=[u,v,r]$.

Estas velocidades, también entran para operarse con la matriz de rotación, esta matriz de rotación tiene dos parámetros de entrada, es el vector "un" y la componente de posición de la guiñada, esta componente se obtiene integrando el vector de salida de la matriz de rotación, y de selección la columna 3 del vector eta, que se realimenta a la matriz de rotación.

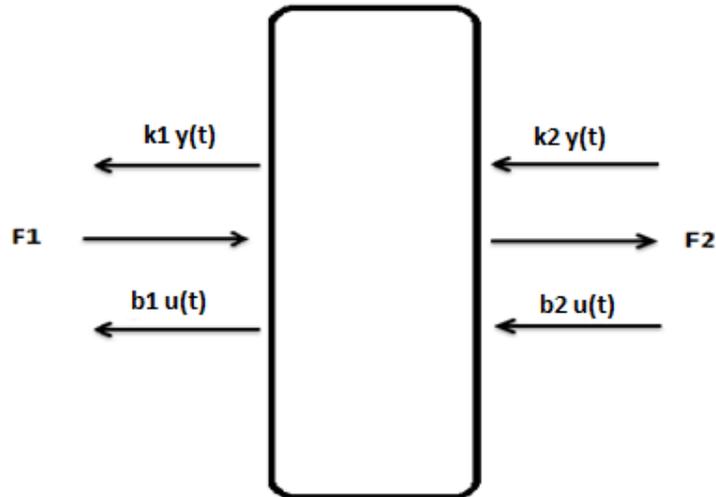
Como primera instancia la componente de la posición de la guiñada va ser cero, pero cada cambio de parámetros se realizar un nuevo cálculo tomando de partida el valor de la posición de la guiña así es como se obtiene el vector "eta".

11.2 MODELADO DEL SISTEMA BUQUE-CILINDROS

Para el desarrollo del sistema de control, se realizó un diagrama de cuerpo libre, en donde se analizaron las fuerzas que actúan sobre el buque, para este caso, ya sea a favor o en contra del movimiento, en la componente de desplazamiento lateral. En este caso, se encuentra la representación de los cilindros hidráulicos, los cuales ejercen una fuerza al buque con el fin de mantener su posición al paso por el canal, se pretende poder controlar con exactitud la fuerza que se ejerce.

Esta es la representación de un sistema masa, resorte y amortiguador, el buque es la masa, en la figura 36 se ilustra resorte y amortiguador, con sus respectivos coeficientes:

Figura 366: Diagrama de fuerzas que actúan en el buque.



Fuente: Elaboración propia

Haciendo un análisis de fuerzas en y se obtiene la ecuación 24:

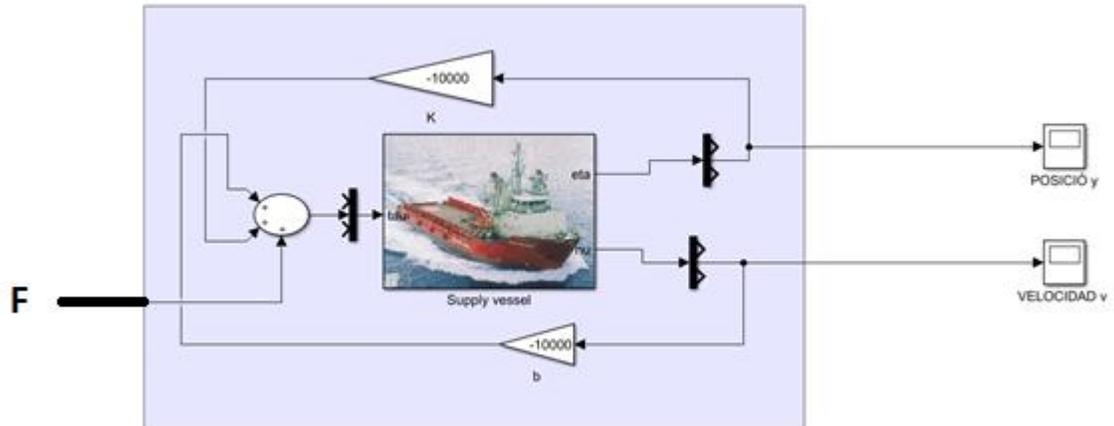
$$\sum Fy = F1 + F2 - 2ky(t) - 2bu(t) \quad (24)$$

Se puede escribir como la ecuación 25:

$$\sum Fy = F - k1y(t) - k2u(t) \quad (25)$$

Puesto que los actuadores ejercerán la misma fuerza y en la misma dirección, se puede simular el sistema considerando una única fuerza F y 2 fuerzas de oposición debidas al resorte y amortiguador, tal como se muestra en la siguiente figura 37.

Figura 37: Simulación del modelo del sistema masa-resorte-amortiguador del sistema buque-cilindros.



Fuente: Matlab 2017a

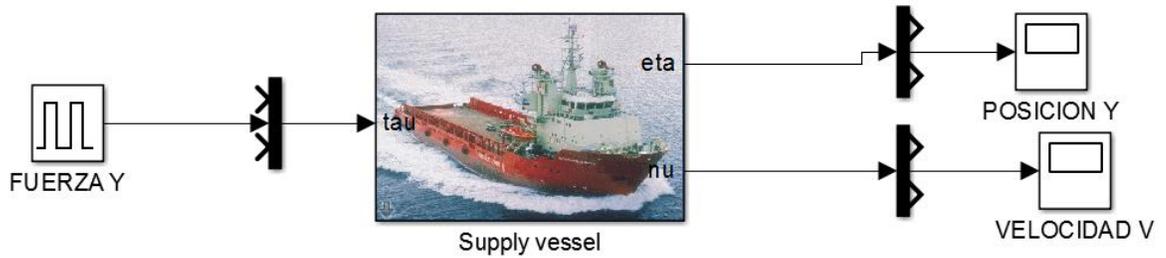
Para efectos de simulación, las constantes K_1 y K_2 se definieron a prueba y error, pues se sale del alcance de este proyecto. Una estimación más adecuada se podría dar desde otro campo de la ingeniería.

11.3 PRUEBA DEL MODELO DEL BUQUE

Se realizó la simulación en lazo abierto aplicando una determinada fuerza ideal en la componente (Y) que se refiere al desplazamiento lateral, solo se aplicó esta fuerza, debido a que los demás movimientos son despreciables, pues solo le quiere dar un control al movimiento de desplazamiento lateral.

El diagrama de bloques de simulación se muestra en la figura 38. Nótese que la entrada de Supply vessel es "tau", un vector de tres entradas (componentes X, Y y Z de fuerza). Sin embargo, para el problema en cuestión, solo se aplica una fuerza en la componente Y. Igualmente las salidas son vectores de posición y velocidad. Para este caso solo se analiza la posición y velocidad en Y.

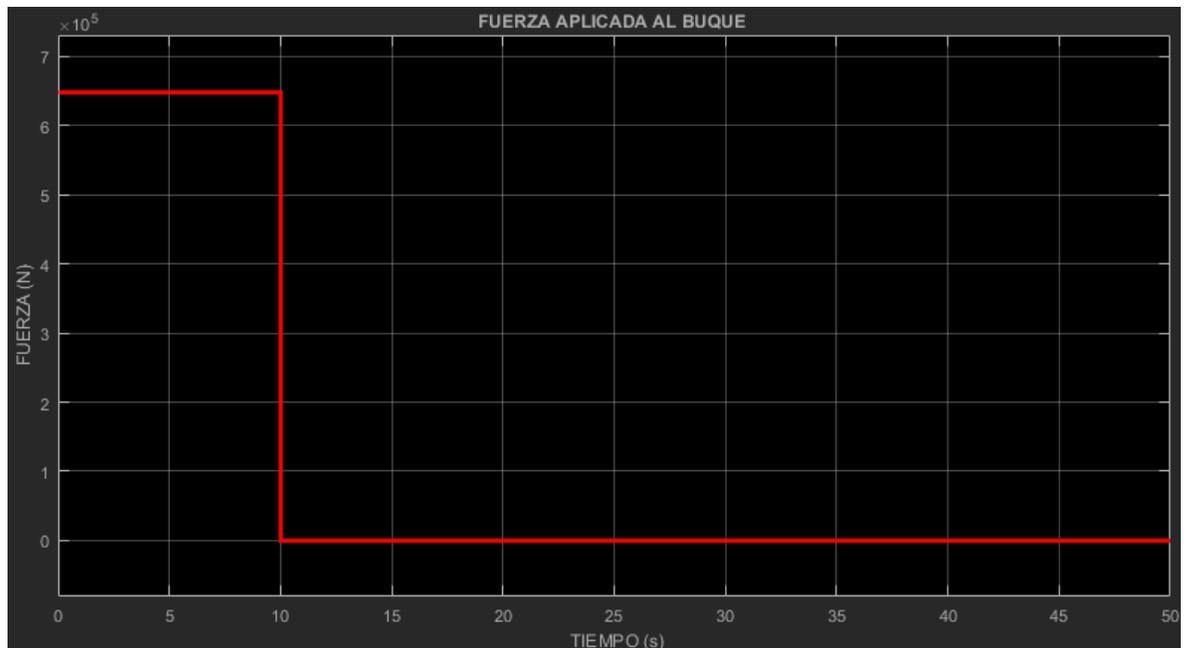
Figura 378: Sistema en lazo abierto del buque



Fuente: Elaboración propia

Se aplicó como fuerza en Y un pulso rectangular de duración 10 s, la cual se muestra (ver figura 39) a continuación.

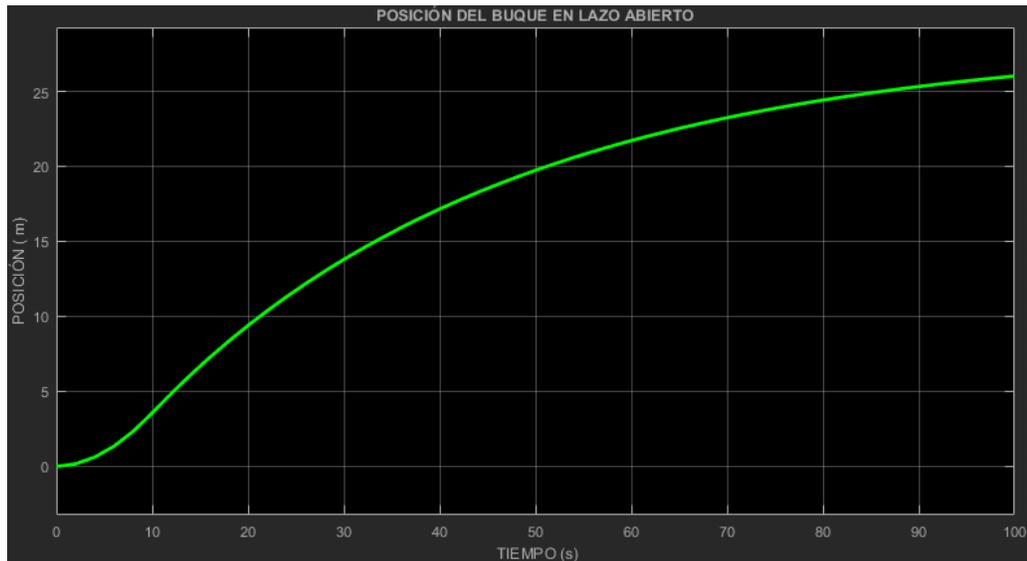
Figura 39: Fuerza aplicada



Fuente: Elaboración propia

La respuesta del sistema ante la fuerza aplicada se muestra a continuación (ver figura 40).

Figura 380: Gráfica variación de posición respecto al tiempo

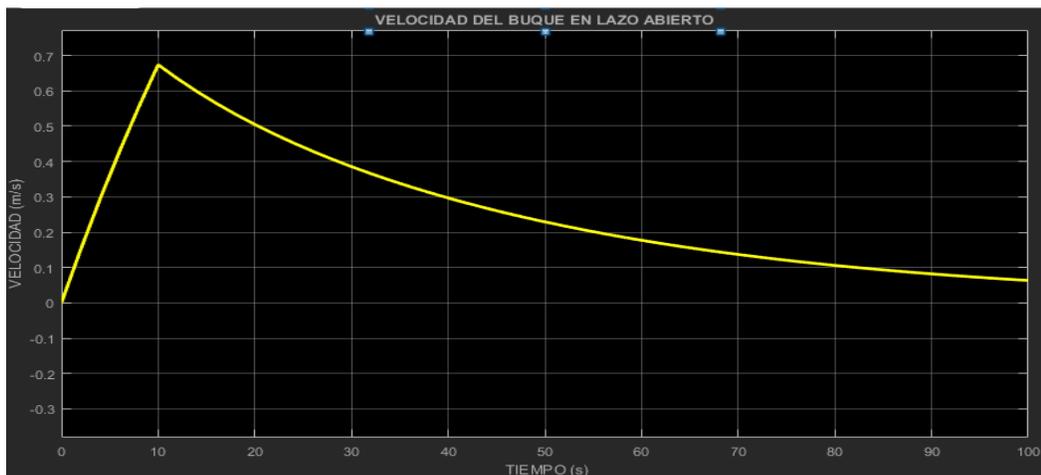


Fuente: Matlab 2017a.

En la figura 40 se ve el cambio de posición que tiene el buque respecto a un punto de partida, se puede identificar que dependiendo del tiempo va aumentando el desplazamiento en donde el eje (X) es el tiempo en segundos y el eje (Y) es la distancia en metros.

En la figura 41 muestra la velocidad respecto al tiempo donde se ve que durante la aplicación de la fuerza en los diez segundos aumenta la velocidad considerablemente, apenas se deja de aplicar dicha fuerza disminuye la velocidad acercándose a cero.

Figura 41: Velocidad respecto al tiempo



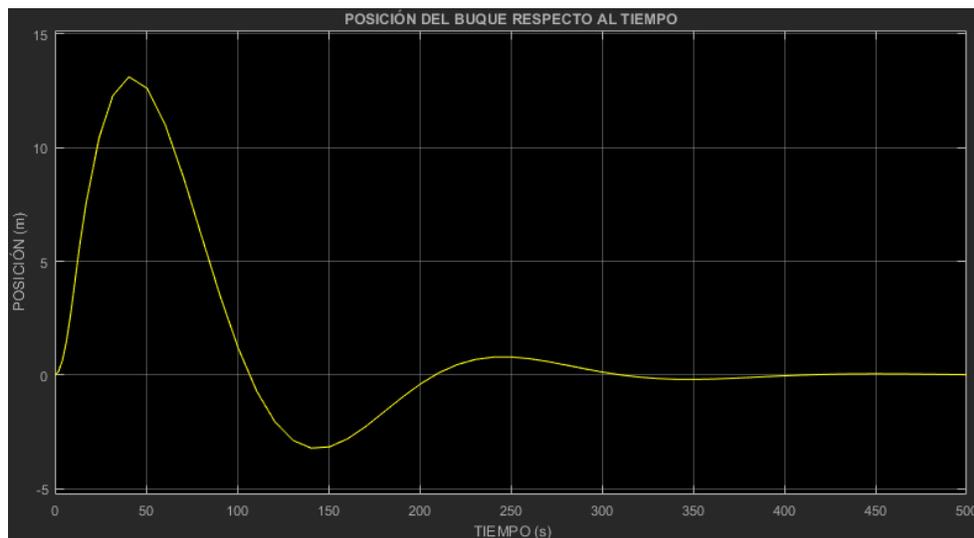
Fuente: Matlab 2017a

11.3.1 PRUEBA EN LAZO ABIERTO DEL MODELO BUQUE-CILINDROS

En esta prueba se aplica como fuerza un pulso de duración 10 segundos y de magnitud 650000, simulando una perturbación sobre el buque con tendencia a desviarlo lateralmente. En la figura 42 se presenta la respuesta del sistema buque con cilindros en lazo abierto. Nótese que el sistema en lazo abierto vuelve a su posición inicial ante esta perturbación; esto debido al efecto del resorte y amortiguados dispuestos al lado y lado del buque. No obstante, el tiempo de estabilización y sobrepico son muy grandes (13 mts y 200 seg respectivamente).

Con este sobrepico, el buque chocaría con las paredes del canal, por lo cual es necesario cerrar el lazo de control de tal forma que mediante la fuerza ejercida por los cilindros se logre un menor tiempo de estabilización y un sobrepico más pequeño.

Figura 42: Salida de sistema en lazo abierto del vector eta.



Fuente: Matlab 2017a.

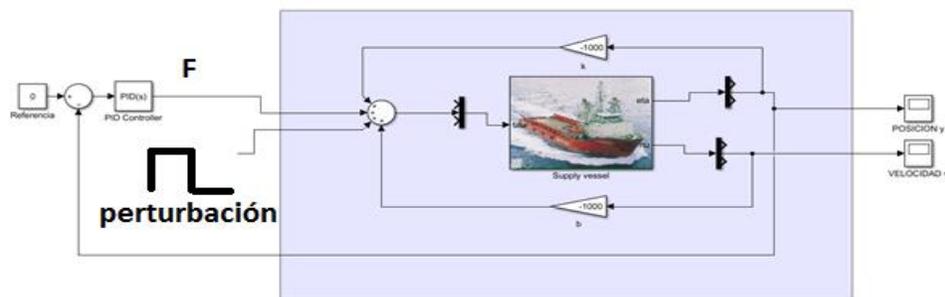
11.3.2 PRUEBA EN LAZO CERRADO

Para el control en lazo cerrado se propone un controlador PID, pues es común que ante respuestas oscilatorias estables como las obtenidas en lazo abierto, su desempeño sea adecuado. En este caso se busca es que el sistema se estabilice en menor tiempo y, realmente se quiere lograr es que el cambio de posición del buque no sea mayor a 4 metros que es la distancia que hay entre el buque y las paredes de las esclusas.

El esquema de simulación en lazo cerrado se muestra en la figura 43. En este sistema se puede observar la misma perturbación descrita en la prueba de lazo abierto, actuando lateralmente sobre el canal. A la salida del controlador PID se tiene la fuerza ejercida por los cilindros que ayudarán a corregir la posición del buque en el menor tiempo posible.

A la entrada del controlador se tiene la señal de error, resultado de realimentar la posición actual del buque y compararla con una referencia cero (puesto que idealmente el buque se debe desplazar por el centro del canal).

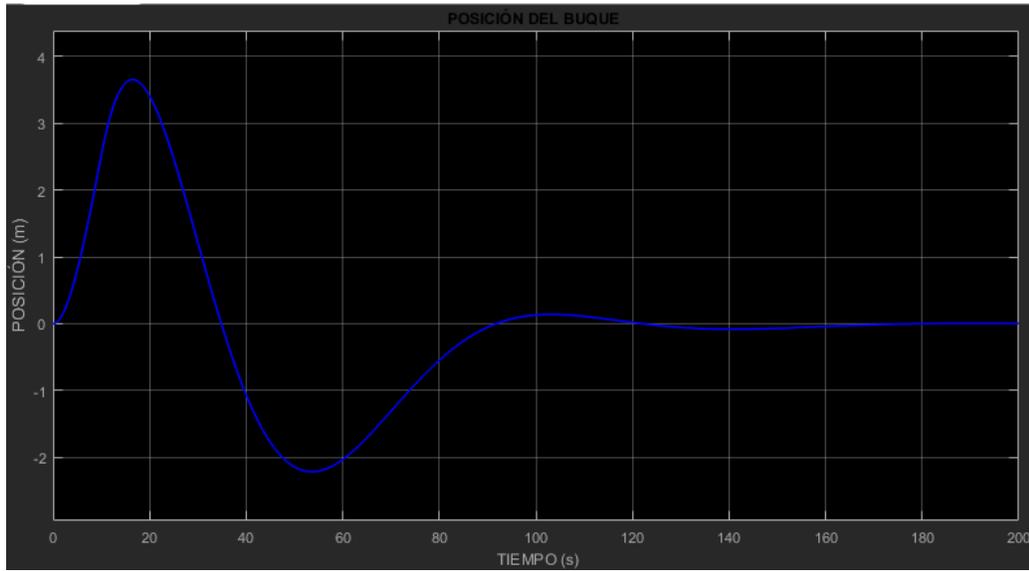
Figura 43: Diagrama de bloques de lazo cerrado.



Fuente: Matlab 2017a

El controlador PID se sintonizó utilizando la herramienta (TUNE) de Matlab, la cual tiene en cuenta el modelo del sistema completo, incluso no linealidades presentes en el mismo. Se podría haber diseñado un controlador analíticamente, pero se sale del alcance de este trabajo de grado a la complejidad del sistema. En la figura 44, se presenta la respuesta del sistema en lazo cerrado, donde el sobrepico máximo obtenido es de 3.7 mts, un valor aceptable de desviación del buque dentro del canal, y un tiempo de estabilización de aproximadamente 100 seg, menor al obtenido en lazo abierto.

Figura 394: Grafica de posición lazo cerrado



Fuente: Matlab 2017a.

12. CONCLUSIONES

La visita técnica al canal de Panamá fue un gran aporte en la comprensión de la problemática a solucionar. Esto debido a que la información consultada vía internet y otras fuentes fue muy limitada y el acceso a información relacionada con el canal de Panamá, muy restringido.

Aunque existen actualmente muchos modelos desarrollados sobre buques en el mar, no se encontró en la literatura modelos de buques bajo las condiciones de un canal. En este trabajo de grado se adaptó un modelo matemático de buques de 3 grados de libertad a las condiciones del canal de Panamá. A partir de este se simuló un sistema de control automático que permite conducir un buque de forma segura a través del canal.

Si bien en el proceso de modelado del sistema se asumieron varios parámetros difíciles de validar, los resultados de simulación fueron razonables y demostraron que la solución de control propuesta podría funcionar en la práctica. De esta forma, este estudio podría constituir una base para futuras investigaciones encaminadas a automatizar la transición de buques en canales.

En esta simulación fue importante poder comprender las alteraciones que sufre un buque por medio de un análisis de fuerzas logrando así una mejor comprensión para el desarrollo de un sistema de control que rectifique las alteraciones en el menor tiempo posible y colocando el buque en una posición correcta para el tránsito por el canal de Panamá.

En investigaciones futuras es importante poder considerar los diferentes comportamientos que puede tener un buque dentro de canales o aguas restringidas ya que no hay investigaciones que ayuden a realizar un modelo con una respuesta óptima a diferentes factores que se pueden presentar.

BIBLIOGRAFIA

- BURKHARDT, Thomas. Sensores de Desplazamiento y Distancia [En línea]. Buenos Aires: Nortécnica S.R.L [citado 3 de junio, 2017]. Disponible en Internet: <URL:http://www.nortecnica.com.ar/pdf/teoria_sens_desp_dist.pdf>
- CACERES, Cayetano Generación y Control de Trayectoria para embarcaciones marinas en aguas poco profundas y espacios confinados, Tesis de Magister, Maestría en ingeniería de control y automatización, Perú: Pontificia Universidad Católica, Facultad de ingenierías, 2016, 152 p
- CHAVES, Jeremías, Aplicaciones de Control en Barcos. Monografía. Ingeniero Eléctrico. Universidad de Costa Rica. Facultad de ingeniería. Departamento de Automática, 2005. 62 p.
- DANFLUVIAL, Esclusas ¿Qué son las esclusas y como pasarlas? Tipos. (En línea). Danfluvial. [Citado 09 de agosto 2017]. Disponible en internet. <URL: <http://www.danfluvial.com/esclusas-que-son-las-esclusas-y-como-pasarlas>>
- HERNÁNDEZ Guzmán, Sandra Milena “El control electrónico y la comunicación remota, una solución para el transporte de pacientes”. Trabajo de Grado. Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería. Electrónica y Telecomunicaciones 2005.
- HERRERA, Camilo y Rafael, Romero. CONTROLADOR DIGITAL PARA UNA PLANTA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA CON UN GRADO DE LIBERTAD. Trabajo de Grado. Ingeniería Electrónica. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería. Programa de ingeniería Electrónica 2010
- IRA E Bennett. (2017, abril) mi canal de panamá. [Online]. <http://micanaldepanama.com/nosotros/historia-del-canal/resena-historica-del-canal-de-panamá/>.
- JIMENEZ, Andrés y Nicolás, Ríos. 2011. “Plataforma de Control de Motores DC para Experimentación en el Área de Control”. Trabajo de Grado. Ingeniería Electrónica. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería. Programa de ingeniería Electrónica 2011.
- LOPEZ, Manuel, Modelado Y Simulación De Sistemas Aplicación Al Buque. 1 ed. Cádiz. España, 1997. 270 p

- LLORCA, José. Proyecto de la Configuración Marítima de los Puertos; Canales de Acceso y áreas de Flotación (ROM 3.1-99), PUERTOS DEL ESTADO, Madrid, 2000, 435 p.
- MARBELLO, Ramiro. Flujo a través de compuertas (en línea). Bogotá: Universidad Nacional de Medellín [Citado 03 de julio 2017]. Disponible en internet: <URL: <http://www.bdigital.unal.edu.co/12697/49/3353962.2005.Parte%209.pdf>>
- MENDOZA, Felipe. Estrategias de Control para Estabilización de Navíos. Trabajo de grado. Ingeniero Civil Electrónico. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica 2009. 67 p.
- PEREZ, Mario. Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo (en línea). San Juan, Argentina: Universidad Nacional de san Juan [Citado 13 de septiembre 2017]. Disponible en internet. <URL: <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>>
- RODRIGUEZ, Casiano. Introducción a Matlab [en línea]. Bogotá: Universidad de Laguna [citado 23 de octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL> <http://nereida.deioc.ull.es/~pcgull/ihiu01/cdrom/matlab/contenido/node2.html>
- SANCHEZ, José. Introducción a Matlab (en línea). Pereira: Universidad de Pereira [Citado 15 de septiembre 2017]. Disponible en internet. <URL: <http://blog.utp.edu.co/jnsanchez/files/2011/03/Matlab-Introducci%C3%B3n-clase13.pdf>>
- VASCO, D. (2017). El Canal de Panamá relega a sus mulas. [online] [diariovasco.com](http://www.diariovasco.com). Available at: <http://www.diariovasco.com/20140216/mas-actualidad/sociedad/canal-panama-relega-mulas-201402161252.html>.
- VILLA, Raúl, Sistemas De Amarre En Buques: Situación Actual Y Evolución Futura. Tesis Doctoral. Ingeniero Naval y Oceánico. Coruña: Universidad de Coruña. Facultad de Ingeniería, 2015, 279 p.
- WALT Bogdanich, J. (2017). En menos de un mes, varios barcos han sufrido más de 100 choques leves en el nuevo Canal de Panamá. [online] [Nytimes.com](https://www.nytimes.com). Available at: <https://www.nytimes.com/es/2016/08/01/las-nuevas-fricciones-en-el-nuevo-canal-de-panama/> [Accessed 22 Oct. 2017].
- WALT Bogdanich, J. (2017). El nuevo Canal de Panamá: lo barato sale caro. [online] [Nytimes.com](https://www.nytimes.com). Available at:

<https://www.nytimes.com/es/2016/06/24/el-nuevo-canal-de-panama-lo-barato-sale-caro/>

- ZAMORA, Pablo. Posicionamiento dinámico: principios, características y operaciones. [en línea]. Bogotá: Universidad de Cantabria [citado 23 de octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL><https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/6290/Pablo%20Tom%C3%A1s%20Zamora%20Sarabia.pdf?sequence=1>

ANEXOS

Fotos Visita Técnica

Figura 405. Locomotora Remolcadora en Mantenimiento



Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Barco Remolcador "Colon"



Fuente: Elaboración propia

Figura 47. Motor y Encoder para Movimiento de las Compuertas de Esclusas de Cocolí



Fuente: Elaboración propia