



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela de Ingeniería Naval

IMPORTANCIA DE LOS CÁLCULOS ASTRONÓMICOS PARA LA NAVEGACIÓN

Tesis para optar al Título de:
Ingeniero Naval
Mención: Transporte Marítimo.

Profesor Patrocinante
Sr. Roberto Casanova Esparza
Oficial de la Marina Mercante Nacional.

EDISON TEODORO ÁLVAREZ CÁRDENAS
VALDIVIA-CHILE
2008

Esta Tesis ha sido sometida para su aprobación a la Comisión de Tesis, como requisito para obtener el grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería.


La Tesis aprobada, junto con la nota de examen correspondiente, le permite al alumno obtener el título de **Ingeniero Naval**, mención **Transporte Marítimo**.

EXAMEN DE TITULO:

Nota de Presentación	(Ponderada) (1)	:	4,706
Nota de Examen	(Ponderada) (2)	:	1,400
Nota Final de Titulación	(1 + 2)	:	6,106

COMISION EXAMINADORA:

ROGELLO MORENO M.
DECANO



[Firma]
FIRMA

ROBERTO CASANOVA E.
EXAMINADOR

[Firma]
FIRMA

CRISTIAN CIFUENTES S.
EXAMINADOR

[Firma]
FIRMA

CARLOS SANGUINETTI V.
EXAMINADOR

[Firma]
FIRMA

XIMENA LABOS S.
SECRETARIO ACADEMICO



[Firma]
FIRMA

Valdivia, 28 JULIO 2008.....

Nota de Presentación = $NC/NA * 0,6 + \text{Nota de Tesis} * 0,2$
Nota Final = $\text{Nota de Presentación} + \text{Nota Examen} * 0,2$
NC = Sumatoria Notas de Currículo, sin Tesis
NA = Número de asignaturas cursadas y aprobadas, incluida Práctica Profesional.

Agradecimientos y dedicatorias

Quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible la realización de esta Tesis y que de una u otra forma me brindaron la guía, apoyo y cariño para lograr mi anhelada meta, fruto de mi esfuerzo dedicación.

*“A toda mi familia, especialmente a mis queridos padres **Juan** y **Sonia**, por todo su esfuerzo en darme estudio y poder hacer cumplir todas mis metas, gracias por el amor, cariño, apoyo, dedicación y confianza al estar separados varios kilómetros, agradecer a mis queridos hermanos **Alex** y **Elvis** por toda su ayuda que me prestaron, a mis **familiares** por su apoyo y confianza para poder cumplir mis metas, a **Vanessa** por entregarme su amor, sonrisa para alegrar mi vida en todos esos momentos difíciles al no estar presente mi familia, a mi **Bebé** por darme la alegría, fuerza y ganas de terminar la Tesis, gracias a todas las personas que ya no están en este mundo, pero estarán siempre en mi corazón, en especial a mí nana **Doralisa** y abuelo **Teodoro**, y finalmente a **Dios** y a **todos los Santos** por iluminar mi camino a seguir y fortalecer mi cuerpo, alma y mente.”*

Gracias por creer en mí, los quiero mucho de todo corazón

Edison Teodoro Álvarez Cárdenas

Índice de Contenidos

	Resumen.	
	Summary.	
	Introducción.	
		Páginas
	Capítulo I: Navegación Astronómica.	1
1.1	Historia.	1
1.1.1	Observaciones sin cronómetro.	2
1.1.2	Desarrollo del cronómetro.	5
1.1.3	Observaciones cronometradas.	7
1.1.4	Correcciones.	8
1.1.5	Desarrollo de métodos de reducción modernos.	8
1.1.5.a	Sumner.	8
1.1.5.b	St. Hilaire.	9
1.1.5.c	Ageton.	11
1.1.5.d	Tablas pre-calculadas.	11
1.1.5.e	Cálculo electrónico.	12
1.2	Presente.	12
1.3	Aplicaciones de los Cálculos Astronómicos en Chile.	13
	Capítulo II: Sistema de Posicionamiento Global (GPS).	14
2.1	Introducción GPS.	14
2.2	Historia del GPS.	15
2.2.1	Fases de desarrollo del GPS.	16
2.2.2	Capacidad de operación.	16
2.3	Características.	17
2.4	Funcionamiento del GPS.	17
2.5	Divisiones del GPS.	20
2.5.1	Espacio.	20
2.5.2	Control.	21

2.5.3	Usuario.	22
2.6	Precisión del GPS.	23
2.7	GPS diferencial o DGPS (Differential GPS).	24
2.8	Aplicaciones del sistema GPS.	25
2.8.1	Aplicaciones militares.	25
2.8.2	Aplicaciones civiles.	26
2.9	Aplicaciones futuras.	26
2.10	Navegación astronómica vs. GPS.	27

Capítulo III: Instrumentos de Navegación. 28

3.1	Mecánicos y Publicaciones para navegación astronómica.	28
3.1.1	Sextante.	28
3.1.1.1	Partes del Sextante.	28
3.1.1.2	Errores del Sextante.	31
3.1.1.3	Uso del Sextante.	31
3.1.1.4	Correcciones a las alturas de astros tomados con el Sextante.	32
3.1.1.4.1	Error instrumental o de índice (Ei).	32
3.1.1.4.2	Refracción.	32
3.1.1.4.3	Depresión (Dip).	33
3.1.1.4.4	Semi-diámetro.	35
3.1.1.4.5	Paralaje (Ph).	36
3.1.2	Almanaque Náutico.	37
3.1.3	Cronómetro.	38
3.1.3.1	Causas que producen variaciones en la marcha de los cronómetros.	39
3.1.3.2	Estado Absoluto.	39
3.1.3.2.1	Determinación del Ea por radiotelegrafía.	40
3.1.3.3	Marcha de un cronómetro.	42
3.1.3.3.1	Modo de operar con épocas.	42
3.1.4	Compás Magnético.	43
3.1.4.1	Clasificación del Compás Magnético.	44
3.1.4.2	Partes de un Compás Magnético.	44
3.1.4.3	Tipos de Compases Magnéticos.	46
3.1.4.4	Variación Magnética (Vmag).	46

3.1.4.5	Desvío (Δ).	47
3.2	Instrumentos Eléctricos.	49
3.2.1	Girocompás.	49
3.2.1.1	Ventajas del Girocompás sobre el Compás Magnético.	49
3.2.1.2	Desventajas del Girocompás.	50
3.2.1.3	Comparación entre el Compás Magnético y el Girocompás.	51
3.2.2	Lorán.	52
3.2.3	Decca.	53
3.2.4	Omega.	53
3.2.5	Sistema Transit.	54
	Capítulo IV: Definiciones de conceptos.	56
4.1	Rumbos, Azimut, Demarcación.	56
4.2	Direcciones del Girocompás.	60
4.2.1	Error del Girocompás (Eg).	61
4.3	El tiempo y su medición.	62
4.3.1	Día Solar Verdadero.	62
4.3.2	Sol medio.	62
4.3.3	Ecuación del tiempo (Et).	63
4.3.4	Eclíptica.	65
4.3.5	Hora Verdadera de un lugar (Hvl).	66
4.3.6	Hora media del Lugar (Hml).	67
4.3.7	Día Sidéreo.	67
4.3.8	Hora media de Greenwich.	68
4.3.9	Zonas y husos horarios.	69
4.3.10	Hora Zona del Lugar (Hzl).	69
4.3.11	Zona del Lugar (Zh).	69
4.4	Esfera y coordenadas celestes.	72
4.4.1	Elementos de la Esfera Celestes.	72
4.4.2	Sistemas de Coordenadas Horizontales.	75
4.4.3	Sistemas de Coordenadas Ecuatoriales o Equinocciales y su Sistema Horario.	78
4.4.4	Sistemas de Coordenadas Uranográficas.	80
4.4.5	Triángulo de Posición y sus elementos.	81
4.4.6	Transformación de coordenadas.	82

**Capítulo V: Descripción y ejercicios de
Cálculos Astronómicos.** 83

5.1	Cálculo de Diagrama de Luz y Oscuridad.	83
5.1.1	Hora del Orto y Ocaso del Sol.	83
5.1.2	Aurora y Crepúsculo.	84
5.1.3	Ejercicio del Diagrama de Luz y Oscuridad.	86
5.1.3.1	Páginas diarias, Incrementos y Correcciones.	90
5.2	Identificación de estrellas y ploteo de planeta.	92
5.2.1	Ejercicio de Identificación de estrellas y ploteo de planetas.	94
5.2.1.1	Método transformación de coordenadas y almanaque náutico.	94
5.2.1.2	Método por Identificador 2102 – D.	96
5.2.1.3	Ploteo de planetas.	98
5.2.1.4	Páginas diarias, Incrementos y Correcciones de los tres métodos.	101
5.3	Cálculo de Error del Girocompás y Desvío por Amplitud.	105
5.3.1	Signo de Amplitud.	106
5.3.2	Casos particulares.	106
5.3.3	Tipos de cálculos Error del Girocompás y Desvío por Amplitud.	107
5.3.3.1	Para un orto u ocaso verdadero.	107
5.3.3.2	Para un orto u ocaso aparente.	108
5.3.4	Ejercicio del Error del Girocompás y Desvío por Amplitud.	110
5.3.4.1	Ocaso Verdadero del Sol.	110
5.3.4.1.1	Páginas diarias, Incrementos y Correcciones.	112
5.3.4.2	Ocaso aparente del Sol.	114
5.3.4.2.1	Páginas diarias, Incrementos y Correcciones, Tablas Nº 27 y 28 de Bowditch.	117
5.4	Cálculo de Error del Girocompás y Desvío por Azimut de astro (Por la hora).	120
5.4.1	Ejercicio de Error del Girocompás y Desvío por Azimut de astro (Por la hora).	120
5.4.1.1	Páginas diarias, Incrementos y Correcciones.	123

5.5	Cálculo Alessio.	125
5.5.1	Ejercicio Alessio.	132
5.5.1.1	Páginas diarias, Incrementos y Correcciones, Tablas A2, A4 y Luna.	139
5.5.1.2	Posición con azimut e intercepto (fórmula larga).	146
5.5.2	Calcular la Latitud Observada por la Estrella Polaris.	147
5.5.2.1	Ejemplo de Polaris.	148
5.5.2.1.1	Páginas diarias, Incrementos y Correcciones, Tabla de Polaris.	149
5.6	Cálculo Recta AM – PM del Sol.	152
5.6.1	Ejercicio Recta AM – PM del Sol.	152
5.6.1.1	Método con Punto adoptado y Gráfico.	152
5.6.1.2	Método con Punto estimado y Gráfico.	156
5.6.1.3	Método con Punto estimado y Gráfico, navegando el Intercepto y Azimut verdadero.	160
5.6.1.4	Páginas diarias, Incrementos y Correcciones, Tabla A2, A4.	164
5.7	Cálculo Recta AM y Meridiana del Sol.	169
5.7.1	Ejercicio Recta AM – Meridiana del Sol.	170
5.7.1.1	Método con Punto adoptado y Gráfico.	170
5.7.1.2	Método Analítico por Pagel con Puntos adoptados.	175
5.8	Cálculo Recta AM y Circunmeridiana del Sol.	180
5.8.1	Ejercicio Recta AM y Circunmeridiana del Sol.	182
5.8.2	Páginas del Almanaque Náutico para la Meridiana y Circunmeridiana.	185
5.9	Cálculo Circunzenital.	191
5.9.1	Ejercicio de Circunzenital.	192
5.9.2	Páginas diarias, Incrementos y Correcciones, Tablas A2, A4.	197
5.10	Cálculo Loxodrómico y Ortodrómica.	203
5.10.1	Navegación de estima.	203
5.10.2	Loxodrómica.	205
5.10.2.1	Loxodrómica < de 600'.	206
5.10.2.1.1	Método analítico de estima.	206
5.10.2.1.2	Ejemplo de Loxodrómica < de 600': cálculo punto de llegada.	209
5.10.2.1.3	Ejemplo de Loxodrómica < de 600': cálculo distancia y	210

	rumbo.	
5.10.2.1.4	Cuadro de Estima.	212
5.10.2.1.5	Casos especiales.	213
5.10.2.1.6	Ejemplo de Loxodrómica < de 600' con Cuadro de Estima.	213
5.10.2.2	Loxodrómica > de 600'.	214
5.10.2.2.1	Ejercicio de Loxodrómica > de 600'.	216
5.10.3	Ortodrómica.	218
5.10.3.1	Cálculo de una Ortodrómica.	219
5.10.3.2	Fórmulas Ortodrómicas.	220
5.10.3.3	Navegación Mixta o Compuesta (Paralelo de Seguridad).	222
5.10.3.4	Ejercicio Analítico de Ortodrómica.	223
5.10.3.5	Ejercicio Gráfico de Ortodrómica.	225
5.10.3.6	Ejercicio Ortodrómica con paralelo de seguridad.	227
	Conclusiones.	233
	Bibliografía y Páginas Web.	235

Resumen

Esta tesis está destinada para aquellas personas que tengan conocimiento en Navegación Astronómica, y en especial para los estudiantes de Ingeniería Naval con mención en Transporte Marítimo de la Universidad Austral de Chile.

Todo oficial de puente o navegante, contar con conocimientos de Cálculos Astronómicos es de suma importancia, ya que este método fue uno de los primeros procedimientos para posicionarse. En la actualidad, aunque están siendo reemplazados por el GPS, ambos dan la posición de la nave (Latitud y Longitud).

Los Cálculos Astronómicos, no han cambiado mucho en sus procedimientos con el paso del tiempo, solo ha cambiado la exactitud de los resultados, dada la creación de nuevos instrumentos y tablas cada vez más sofisticados, entre los cuales se cuentan: el Almanaque Náutico, Cronómetro y Sextante. Con la aparición de éstos los cálculos se han mantenido en sus procedimientos.

Los Sistemas de Posicionamiento Electrónico también han evolucionado con el tiempo. En el presente existe el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que proporciona con rapidez datos anexos a la posición, lo cual los Cálculos Astronómicos están siendo actualmente reemplazados, aunque es conveniente considerar que estos instrumentos dependen de la electricidad y están expuestos a fallas.

Por lo anterior, esta investigación se desarrollará a partir de conceptos básicos de Navegación Astronómica, hasta llegar a la explicación de los diferentes tipos de cálculos y ejercicios de posición y errores instrumentales.

Summary

This thesis is destined for those persons who have knowledge in navigation Astronomical and especially for the students of Naval Engineering with mention in Maritime Transport of the Austral University of Chile.

Every official of Bridge or navigator, must possess knowledge of Astronomic Calculations performs supreme importance, since this method was first one of the procedures to be positioned. At present though they are being replaced by the GPS, both give the position of the ship (Latitude and Longitude).

The Astronomic Calculations, they have not changed very much in his procedures with the passage of time, only there has changed the accuracy of the results, given the creation of new instruments and tables increasingly sophisticated, among which they count: The nautical almanac, Chronometer, Sextant. With the appearance of these calculations they have been kept in their procedures.

The systems of Electronic positioning also have evolved with the time. In the present there exists the Global positioning system (GPS), which provides with rapidity attached information to the position, which the Astronomic calculations are being replaced nowadays, though it is suitable to think that these instruments depend on the electricity and are exposed to faults.

For the previous thing, this investigation will develop from basic concepts of Astronomic Navigation, up to coming to the explanation of the different types of calculations and exercises of position and instrumental mistakes.

Introducción

Las personas que se desempeñan en la labor marítima, principalmente a los Oficiales de Puesto, deben poseer una diversidad de conocimiento en lo que respecta a seguridad, maniobras, estiba y navegación.

Es por esto que el propósito de esta investigación, es conocer en profundidad los conocimientos de la navegación astronómica, la cual estudia las posiciones aparente en que se ven los astros y a través de estos obtener la posición del buque en la mar.

En lo que respecta a los cálculos astronómicos se han propuesto cientos de inventos y de métodos en la navegación astronómica. Pero hay algunos inventos que sobresalen, difundiéndose por ser ingeniosos, ayudando a resolver las necesidades humanas de forma más sencilla y elegante. Estos inventos se convirtieron en punteros en su tiempo y en clásicos con el paso del tiempo. No se destacan los inventos mecánicos como el cronómetro o el sextante sino también los métodos de cálculo como: Diagrama de Luz y Oscuridad, Alessio, Recta AM – PM, Recta AM y Meridiana, etc.

En la actualidad el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), reemplazó en gran parte el conocimiento de la navegación astronómica como algo práctico, pero no deja de ser una ciencia y un arte muy interesantes en sí mismos. No es posible que el GPS haga desaparecer la navegación astronómica al igual que el motor no hizo desaparecer la navegación a vela, ni la fotografía a la pintura.

El propósito de esta investigación es resumir el desarrollo de la navegación astronómica a lo largo de los siglos, y remarcar su importancia.

Cabe destacar que esta publicación es para aquellas personas que ya tienen conocimiento en la navegación astronómica, así como también, para los que deseen incrementar sus conocimientos, sobre todo a los estudiantes de ingeniería naval, con el motivo de incentivar e interrelacionar en la especialidad de oficial de puente para la Marina Mercante Nacional.

Conclusiones

Los capítulos tratados en esta investigación, se desarrollaron de la forma más fácil posible para que los interesados en leer esta publicación puedan entender más rápidamente.

Todas las materias descritas con respecto a ejercicios de navegación, se desarrollaron conforme a los resultados que un oficial requiere, cuando se desempeña en el puente de mando de una nave, de modo que le permitan aplicar acertadamente los distintos métodos y procedimientos para obtener con exactitud la posición de su buque, y con ella navegar en forma segura a su destino.

Los modernos sistemas de navegación no están exentos de averías. El GPS y los sistemas radioeléctricos e hiperbólicos pueden estar fuera de servicio por causas ajenas al propio navegante por lo que, los sistemas tradicionales, es decir, la navegación costera, de estima, y principalmente la navegación astronómica o de altura mediante la observación de astros, siempre darán una buena situación.

Para los oficiales de la Marina Mercante Chilena, es obligatorio aprender Navegación Astronómica para seguir ascendiendo en sus grados, esto hace a nuestro país tener oficiales más completos en sus conocimientos, siendo los mejores oficiales del mundo.

Por lo tanto, en mi opinión, nunca se debería abandonar la enseñanza de la navegación astronómica, ya que se requiere estudiar y tener práctica para poseer habilidad y agilidad en los cálculos astronómicos, y así no depender totalmente de sistema electrónico, como el GPS, aunque la interpretación de dicha información por parte de algunos, ocasionalmente puede ser errónea.

El conocimiento de la Navegación Astronómica hoy día es necesario, ya que el hecho de que se empleen con fines marítimos, no excluye los militares, por lo que ante un conflicto bélico, lo más probable es que queden fuera de servicio el GPS y se tenga recurrir al sistema convencional de situación. Se consiguen dos objetivos: el primero es tener un conocimiento más amplio, que permite tener una visión correcta de lo que se está haciendo, asimilando si es disparatado o no un resultado obtenido, en vez de ser un número abstracto, y el segundo objetivo es constituir una parte importante de la cultura del marino.

Cada vez existe una mayor tendencia por parte de algunos navegantes a confiar en exceso en los sistemas de posicionamiento global, teniendo poco en cuenta la vulnerabilidad de esos sistemas en términos de precisión, confiabilidad, disponibilidad e integridad.

Es inevitable que, para la mayoría de los navegantes, la introducción de nuevos sistemas de navegación satelital más precisos, junto con la cada vez mayor disponibilidad de dispositivos electrónicos de determinación de posición, y sistemas de cartas electrónicas nuevos o existentes, a precios accesibles, finalmente eliminarán la necesidad de algunos de los métodos tradicionales de determinación de posición.

Bibliografía y Páginas Web

- S.H.O.A (Púb. 3030). Manual de navegación Vol 1. Tercera edición, Chile: 1987.
- S.H.O.A (Púb. 3019). Almanaque Náutico, Chile: 1998. Con la autorización y datos numéricos idénticos proporcionados por el Controller Of Her Majesty's Stationary Office de Gran Bretaña (Puc 33 /261 de 6 Marzo 1984) - (Puc 33 / 261 de 3 de Mayo 1989).
- Grupo académico de ramos de cubierta. Tablas Bowditch. Escuela Naval Arturo Prat, Chile: 1978.
- CASANOVA, Roberto. Apuntes de Navegación. Valdivia, Universidad Austral de Chile.
- CASANOVA, Roberto. Preguntas de navegación. Valdivia, Universidad Austral de Chile: 1999-2001.
- CASANOVA, Leonardo. Apuntes Posicionamiento Global por Satélite (GPS).
- Dpto. de Tecnología Electrónica. Sistema de posicionamiento global (GPS) Universidad de Málaga.
- I.H.A (Púb. 3031). Manual de navegación Vol. 2. Primera edición, Chile: 1989.
- ROJAS, Julio. Teoría y aplicación de la compensación de compases magnético de una nave, 1977.
- LÉNIZ DRÁPELA, Roberto. Apuntes y Ejercicio de Cálculos de Navegación.
- www.Rodamedia.org
- www.Shoa.cl
- www.elportaldelosbarcos.com
- <http://es.wikipedia.org>
- www.directemar.cl
- www.asifunciona.com
- www.cstg.com.ar
- www.emagister.com
- www.zonagps.com