

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS DE LA NAVEGACIÓN,
MÁQUINAS Y CONSTRUCCIONES NAVALES

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO
(NÁUTICA Y MÁQUINAS NAVALES)

**SISTEMA DE COMPENSACIÓN SIMPLIFICADO
DEL DESVÍO SEMICIRCULAR PARA BITÁCORA
CON COMPÁS DE CLASE "A"**

Autor

JOSU ARRIBALZAGA AURRE

Director

AITOR T. MARTÍNEZ-LOZARES

TESIS DOCTORAL

BILBAO, ENERO 2016

*La tecnología no es más que
"cosas que aún no funcionan."*

Bran Ferren

DEDICATORIA

*Neure sendiko guztiei, direnak eta izen direnak, zeozer behar izan doten guztian, hor
egon zarielako.*

*A toda mi familia, los que son y han sido, porque siempre que lo he necesitado, habéis
estado ahí.*

To my family, those who are and have been, because whenever I have needed
something, you have been there.

A toute ma famille, ceux qui sont et ont été, parce que chaque fois que je l'ai
besoin, vous avez été là.

AGRADECIMIENTOS

Con mucho temor, casi lo más complicado de la presente tesis, y creo que con toda osadía entro a agradecer infinitamente a todos los que me acuerde de enunciar en este apartado y ojalá no me olvide de nadie, y si el caso ocurriere mis más sinceras disculpas de antemano, no habiendo sido, ni siquiera remotamente , esa mi intención.

A Javier Zúñiga, que en unas circunstancias más que ajustadas en tiempo, por los planes de postgrado cambiantes y encontrarnos huérfanos en nuestro Departamento en aquellos momentos, nos permitió realizar la inscripción de la presente tesis en su Departamento cuando esta se encontraba en un estado más que avanzado y abirme así las puertas que han para imbuirme en la última parte de su desarrollo.

Aprovechando que hablo de ese mismo Departamento, a Gotzon Madariaga y a Cesar Folcia, por su más que interés en la materia que he tratado, consiguiendo hasta que me considere un privilegiado al haberme aceptado en ese grupo de expertos que forman ese equipo y completar así el tribunal de valoración de la presente tesis.

A Fernando Cayuela, compañero de la ETS de Náutica que con su ayuda en el ámbito docente de Leioa encontró la puerta de acceso a la inscripción de la presente tesis.

A Aitor Martínez, Director de la presente tesis, y compañero de batallas en la ETS de Náutica que sin su direccionamiento y sus conocimientos en los espacios en que nos desenvolvemos jamás hubiera definido la proyección a seguir para la elección del tema y su elaboración, así como conferencias coloquios, artículos, etc. que hemos podido desarrollar para acometerlas de manera conjunta.

A Manu Barandiaran, que sin su colaboración nunca hubiera conocido a su compañero Alfredo García y por lo tanto tampoco hubiera podido navegar por la ruta adecuada y probablemente me hubiera sumergido entre tinieblas sin rumbo fijo.

A Alfredo García Arribas, compañero, que sin conocerle y desinteresadamente, se ofreció a complementar mis trabajos con otros suyos, fuera de su ámbito laboral, para llevar a buen puerto el complicado viaje en el que me había sumergido. Con toda mi amistad por el gran acompañamiento realizado desde el principio hasta el final. Un fortísimo abrazo Alfre y para lo que necesites, aquí me tienes con mi más eterno agradecimiento.

Neure anai bixeri Gotzon eta Imanoleri. Euren arduriegaitik danak ondo urten deijen.

Pedro Atutxari beti laguntzen egon dalako behar dan erara eta behar mduen gausak egiteko.

Jon Arriaga bere tailera eta herremientak neure esku itxitiarren behar izan doten guztian.

A Ricardo López, por su inestimable cooperación e interés para que la tesis saliera en las condiciones más óptimas por su gran experiencia en manipulación en redes y sistemas informáticos.

A Nieves Lorenzo, bibliotecaria del centro, de inestimable valía, y por estar ahí siempre dando ánimos y ayudando en todas las búsquedas solicitadas.

A Mikel Arrieta, por habernos permitido, de manera altruista, la utilización del buque "Ortze" para realización de distintas pruebas de mar con los varios equipos en él instalados.

A Javier Peñaredonda, también por haberme permitido el uso, de manera totalmente altruista, del “Villa de Portugalete” embarcación clave, para la finalización de las pruebas de campo en esta última fase.

A las tripulaciones del “Ortze” y “Villa de Portugalete” por su inestimable cooperación en todas las ocasiones en las que he precisado de su colaboración.

A Alberto Basterretxea, por poner su embarcación “Lau A Bi” a nuestra disposición y su gran contribución logística y culinaria.

Neure Ama Maaleneri, anaiak Gotzon eta Imanoleri, Isabel, Ainhoa eta Landerreri, benetan biotz-bihotzetik, veste mille urtetan holantxik.

A todos los que no aparecen, pero que sí me han acompañado en estas singladuras, contribuyendo a que este proyecto haya llegado a tan demandado y deseado puerto, seguro, se me quedan en el tintero, pero siempre estarán en mi memoria.

Un verdadero agradecimiento por todo lo que me habéis aportado y soportado.

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.- Presentación.....	3
1.2.- Motivo de la Tesis	5
1.3.- Estado de la Técnica	7
2.- EVOLUCIÓN EN LA ORIENTACIÓN DE LOS BUQUES	11
2.1.- Evolución histórica de la aguja magnética.....	13
2.2.- Aparición y desarrollo del compás giroscópico	55
3.- AGUJA Y DECLINACIÓN MAGNÉTICA, DESVÍO Y COMPENSACIÓN	65
3.1.- Aguja Magnética, Declinación Magnética (δm) y Desvío (Δ).....	67
3.2.- Interés actual de la compensación de la aguja magnética.....	71
3.3.- Realización de una compensación.....	77
4.- OBJETIVOS	81
5.- MATERIALES Y MÉTODOS	87
5.1.- Materiales e Instrumentos Utilizados	89
5.2.- Parte experimental a bordo de buques	109
5.2.1.- "Ortze" (Pruebas iniciales).....	109

5.2.2.- “Villa de Portugalete” (Pruebas definitivas)	119
5.3.- Métodos Utilizados	139
5.3.1.- Determinación del momento magnético de un imán corrector	139
5.3.2.- Desarrollo de la aplicación matemática.....	147
6.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	161
7.- CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES	207
7.1.- Conclusiones	209
7.2.- Futuras investigaciones	213
8.- BIBLIOGRAFÍA	215
9.- ANEXO I	231

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Fotografías del artefacto Olmeca M-160 con una escala en cm. Fuente: CARLSON, J.B.	15
Figura 2.2: (Izq.) Vista en planta y alzado del M-160 (dimensiones en milímetros) y representación del experimento flotante mostrando la orientación observada de $35,5^\circ$ al oeste del norte magnético. (Dcha.) Vector M y componentes del momento magnético total del M-160. La dirección de M es el de búsqueda del polo norte, y-z es el plano de flotación del M-160, y el eje z es paralelo a la ranura incisa. El artefacto no está dibujado a escala ni a proporción exacta. Fuente: CARLSON, J.B.....	15
Figura 2.3: La placa lacada, es una reconstrucción del original en bronce, que data del siglo IV a.C., realizada por Wang Chen-To que se exhibe actualmente en el Museo de Historia China en Pekín.	17
Figura 2.4: Placa-terrestre y piedra imán: reconstrucción esquemática de Wang Chen-To (Wang Zhen-Do) que muestra cómo la forma de la cuchara permite la rotación sobre su concavidad en respuesta a la atracción magnética.	18
Figura 2.5: Carro indicador del Sur. (Modelo de George H. Lanchester de 1947). Museo de la Ciencia de Londres.....	19
Figura 2.6: Fotografías de acción mostrando la eficiencia de la reconstrucción del mecanismo de engranaje diferencial del carro señalador del Sur (de Mr. George H. Lanchester). Fuente: NEEDHAM, J.....	20
Figura 2.7: [Leer verticalmente] 1. La aguja se coloca sobre la uña de un dedo. 2. Aguja colocada en el agua (Se pasa por una mecha). 3. Aguja suspendida por un hilo unido con una gota de cera. 4. Aguja colocada en el borde de un recipiente. — Experiencias con la aguja imantada descritos en el Mêng Chhi Pi Than (1089-1093). Diseños realizados por Wang Chen-To. Fuente: SHU-HUA L.	22

Figura 2.8: Formas tempranas del compás magnético: La lámina de hierro en forma de pez flotante descrito en el Wu Ching Tsung Yao (Chhien Chi). Fuente: NEEDHAM, J.....	23
Figura 2.9: Reconstrucción de Wang Chen-To.	23
Figura 2.10: Formas tempranas del compás magnético: El pez flotante de madera que contiene magnetita y la aguja se describe en el Shih Lin Kuang Chi, (c. 1150). La piedra imán y la proyección del puntero de la aguja se fijan en su lugar con cera. Fuente: NEEDHAM, J.	24
Figura 2.11: Formas tempranas del compás magnético: La tortuga de madera sobre pivote en seco que contiene magnetita y la aguja se describe en el Shih Lin Kuang Chi, (c. 1150). Fuente: NEEDHAM, J.	25
Figura 2.12: Formas tempranas del compás magnético: La tortuga de madera sobre pivote en seco que contiene magnetita y la aguja se describe en el Shih Lin Kuang Chi, (c. 1150), sección en alzado. Fuente: NEEDHAM, J.....	26
Figura 2.13: Jacobus de Vitriaco. Fuente: http://www.araldicavaticana.com/cardvitry.htm	29
Figura 2.14: Pierre Pelerin de Maricourt. Aguja rotatoria de una brújula en una copia de la "Epístola de Magnete" (1269). Fuente: http://www.ecured.cu/index.php/Petrus_Peregrinus y Wikipedia.	30
Figura 2.15: Brújula del libro traducido al inglés. "The letter of Peter Peregrinus on the magnet" [99].	30
Figura 2.16: Girolamo Cardano. Fuente: http://ecosanar.com/CRONO/	33
Figura 2.17: Dibujos del libro <i>The Newe Attractive, Showing the Nature, Propertie, and Manifold Vertues</i>	35
Figura 2.18: William Gilbert. Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/William_Gilbert	36
Figura 2.19: Arriba: Forjando una aguja magnética en la dirección del campo magnético terrestre; del libro "De Magnete" de William Gilbert, (1600).....	37
Figura 2.20: Retrato de Gowin Knight realizado por Benjamín Wilson. Fuente: http://www.sil.si.edu/digitalcollections/hst/scientific-identity/CF/display_results.cfm?alpha_sort=k	38
Figura 2.21: Capitán Matthew Flinders, 1808. Fuente: http://www.datuopinion.com/matthew-flinders	39
Figura 2.22: William Scoresby Jnr. Fuente: http://www.whitbymuseum.org.uk/collections/scoresby1.htm	40

Figura 2.23: Thomas Young. Fuente: http://todayinsci.com/Y/Young_Thomas/YoungThomas-Quotations.htm	41
Figura 2.24: George Biddel Airy, London Illustrated News, 4 January 1868.....	44
Figura 2.25: Siméon-Denis Poisson, detail of a lithograph by François-Séraphin Delpech after a portrait by N. Maurin. Courtesy of the Archives de l'Académie des Sciences de Paris; photograph, J. Colomb-Gerard, Paris.....	45
Figura 2.26: Studio portrait photograph by Maull and Polyblank of Archibald Smith, MA, FRS (1813-1872), English mathematician who wrote on the deviation of the compass.....	46
Figura 2.27: William Thomson y su bitácora. Fuente: http://global.britannica.com/biography/William-Thomson-Baron-Kelvin	48
Figura 2.28: Rosa del compás de William Thomson, con un gran diámetro, ocho agujas, treinta y dos hebras de seda y la rosa recortada, 1876.....	49
Figura 2.29: Bitácora de William Thomson (Lord Kelvin) de 1876 (Museo Marítimo de Málaga).	50
Figura 2.30: Edward John Dent, 1890 http://www.dentlondon.com/about/history.php	51
Figura 2.31: Ettrick William Creak, 1917. Fuente: De Walter Stoneman Bromide print. National Portrait Gallery, London.....	53
Figura 2.32: Fotografía de Johann Gottlieb Friedrich Bohnenberger. Fuente: Universidad de Tübingen.	55
Figura 2.33: Ejemplar de la máquina de Bohnenberger recientemente descubierto (hacia 1813) y Dibujo de la publicación original de Bohnenberger de 1817(City Museum (Stadtmuseum) of Tübingen).....	56
Figura 2.34: (Izq.) Fotografía del aparato de demostración del giróscopo de Foucault, 1883 (Science & Society Picture Library). (Ctro.)Fotografía de Jean Bernard León Foucault. (Dcha.) Giróscopo inventado por Léon Foucault, y construido por Dumoulin-Froment, 1852. Fotografía tomada en el National Conservatory of Arts and Crafts museum, Paris.....	57
Figura 2.35: Fotografía de Arthur Constantin Krebs. Fuente: Director General de la compañía Panhard & Levassor en 1910	58
Figura 2.36: Diseño del giróscopo de Dumoulin-Krebs de 1889. Fuente: Archivos de la familia Krebs. Autor Philippe Krebs.	58
Figura 2.37: Fotografía del corte de la esfera de un girocompás Anschütz y girocompás original completo.....	59
Figura 2.38: Fotografía de un girocompás Anschütz actual.....	59

Figura 2.39: Fotografía de Charles F. Goodeve. Fuente: De la Universidad de Manitoba, ex-alumno y ex funcionario de la División de Winnipeg.	61
Figura 2.40: Fotografía de Igor Vasílievich Kurchátov	62
Figura 2.41: Fotografía de Roger L. Easton en el Salón de la Fama de los Inventores Nacionales. Fuente Salón de la Fama de los Inventores Nacionales 2010.....	63
Figura 3.1: Tablilla de desvíos del Allure of the Seas.....	78
Figura 5.1: Despiece del plato de compensación y su distanciador. Fotografía del autor.	96
Figura 5.2: Despiece del soporte del plato de compensación. Fotografía y soporte del autor.	96
Figura 5.3: Soporte y plato de compensación montado completo con imanes incluidos, listo para colocar en la bitácora. Fotografía y soporte completo del autor.	97
Figura 5.4: Fase inicial de imantación de un material ferro-magnético denominada curva de primera imantación.....	98
Figura 5.5: Fase segunda de desimantación e inversión del campo magnético y saturación negativa.....	99
Figura 5.6: Fase tercera de cierre del ciclo de histéresis.	100
Figura 5.7: Gráficos representando dos tipos de materiales, duros y blandos.	100
Figura 5.8: Fotografía de la pseudo-bitácora de pruebas.....	103
Figura 5.9: Fotografía de la pastilla fluxgate.	104
Figura 5.10: Fotografía de los imanes correctores y referencia de su tamaño.	104
Figura 5.11: Fotografía del CMI compass. Fuente Aitor Martinez-Lozares	105
Figura 5.12: Fotografía del TMC que vamos a utilizar. Fuente Aitor Martinez-Lozares.	105
Figura 5.13: Fotografía del flux electrónico FG1-045 MK2 de Red Line Instruments. Referencia de Chris Cole.....	106
Figura 5.14: Fotografía del flux con la pieza de centrado y soporte. En la otra fotografía instrumento con cableado a utilizar.....	107
Figura 5.15: Fotografía del HUAWEI Mobile WiFi E5372	108
Figura 5.16: Fotografía de J. Pons en Pasajes. Fuente: Baixamar.	109
Figura 5.17: Fotografía del espacio libre para el emplazamiento de la nueva bitácora.....	111
Figura 5.18: Fotografía con la ubicación de la nueva bitácora en relación con la original y en el emplazamiento definido del "Ortze".....	111

Figura 5.19: Fotografía de la bitácora y aguja originales del buque “Ortze”	112
Figura 5.20: Fotografía del sistema de compensación de la aguja del “Ortze” con sus imanes compensadores en posición.	112
Figura 5.21: Fotografía de la instalación realizada para la nueva ubicación del pseudo-compás en la misma.	113
Figura 5.22: Fotografía de la conexión del cable del “fluxgate” a la instalación del buque y al CMI.....	114
Figura 5.23: Fotografía con la imagen de una captura de la pantalla del CMI compass.....	114
Figura 5.24: Imagen de captura de una pantalla del ECDIS del Ortze”	115
Figura 5.25: Fotografía de la captura de la pantalla del CMI con los desvíos registrados por el mismo.	116
Figura 5.26: Fotografía del detalle de la captura de la pantalla del CMI con los desvíos captados por el mismo.....	116
Figura 5.27: Fotografía del detalle de la captura de la pantalla del CMI con detalle de los coeficientes registrados por el mismo.	117
Figura 5.28: Fotografía de la lancha de amarre y servicios portuarios “Villa de Portugalete” . Fuente: Impresa en fotografía.	119
Figura 5.29: Fotografía del puente y consola de gobierno del “Villa de Portugalete”	121
Figura 5.30: Fotografía del GPS satelital, del fabricante JRC.....	121
Figura 5.31: Fotografía del CMI, equipo cedido por el Director de Tesis AitorMartínez.	122
Figura 5.32: Fotografía de la instalación realizada de todo el instrumental a utilizar durante la experiencia.	122
Figura 5.33: Fotografía con el cableado de conexión de la antena satelital y el fluxgate para la experiencia.	123
Figura 5.34: Fotografía del fluxgate original situado en la parte superior de la aguja magnética.....	123
Figura 5.35: Fotografía del piloto automático conectado al fluxgate original de la aguja magnética.....	124
Figura 5.36: Fotografía del fluxgate a utilizar en el experimento previa a su instalación.....	124
Figura 5.37: Fotografía de la parte inferior de la aguja donde se ubicó el segundo fluxgate.	125
Figura 5.38: Fotografía de la colocación de la base de la antena satelital.....	125
Figura 5.39: Fotografía base para colocación de la antena.....	126

Figura 5.40: Fotografía del posible emplazamiento de la nueva bitácora experimental.....	126
Figura 5.41: Fotografía de la nueva base de la bitácora colocada en su ubicación. Detrás la bitácora del Villa de Portugalete con una protección de canvás o lona.	127
Figura 5.42: Fotografía de la bitácora colocada en su posición.....	127
Figura 5.43: Fotografía del nuevo pedestal y nueva ubicación de la antena satelital.....	128
Figura 5.44: Fotografía de la ubicación de la antena y de la bitácora desde cubierta principal y desde proa del buque.....	129
Figura 5.45: Fotografía del cuadro de conexión de la corriente de 24 VDC.....	130
Figura 5.46: Fotografía del CMI una vez inicializado. El software es igual al utilizado por el sistema Windows.	130
Figura 5.47: Fotografía del panel del CMI.	131
Figura 5.48: Fotografía del conector Wi-Fi.....	131
Figura 5.49: Fotografía de la unidad de control del GPS de la empresa JRC.....	132
Figura 5.50: Fotografía de la pantalla del CMI en una de las opciones del mismo.....	133
Figura 5.51: Fotografía de la pantalla del CMI en otra de las opciones del mismo.	133
Figura 5.52: Fotografía de la pantalla del CMI. En este caso la rosa central indica que el rumbo que se ve en pantalla es un rumbo verdadero satelital.....	134
Figura 5.53: Equipo completo montado y en funcionamiento. CMI indicando Rumbo Norte o 000.1°.....	135
Figura 5.54: Equipo completo montado y en funcionamiento. CMI indicando Rumbo Este o 090.0°.....	135
Figura 5.55: Equipo conectado y funcionando. En la parte superior de la pseudo-bitácora se ve al flux digital y en la inferior el plato con los imanes compensadores.	136
Figura 5.56: Flux FG1-045. Fuente: (Red Line Instruments).....	137
Figura 5.57: Fotografía de los imanes correctores y referencia de su tamaño.	139
Figura 5.58: Gráfico que representa la posición de imanes y vectores relacionados a cada uno de ellos. Fuente: Serviciencia, S.L. www.serviciencia.es	140
Figura 5.59: Fotografía representando la fijación de un imán corrector, que el autor utilizará en la experiencia, en el goniómetro de medición.....	141
Figura 5.60: Fotografía representando la medición, donde se aprecian el fluxgate dentro de las bobinas de Helmholtz y el imán sobre el goniómetro frente al fluxgate.	142

Figura 5.61: Gráfico que representa los componentes del campo magnético “B” creado por un momento magnético m , en coordenadas polares, en un punto cualquiera (r, θ)	143
Figura 5.62: Gráfico que representa el valor de “ m ” en distintas posiciones de medición, a una distancia de 164 mm entre el fluxgate y el imán.	144
Figura 5.63: Gráfico que representa el valor de “ m ” en distintas posiciones de medición, a una distancia de 244 mm entre el fluxgate y el imán.	144
Figura 5.64: Gráfico que representa el valor de “ m ” en distintas posiciones de medición, a una distancia de 325 mm entre el fluxgate y el imán.	145
Figura 5.65: Gráfico que representa la posición de los imanes y los vectores relacionados a cada uno de ellos.	147
Figura 5.66: Gráfico representando los imanes en forma de vectores.	152
Figura 5.67: Página para el cálculo de la componente horizontal terrestre. Fuente NOAA...	158
Figura 6.1: Gráfico representando el campo magnético "B" en relación a la distancia "z" (caso de imanes m_1 y m_3 con un valor determinado, imanes m_2 y m_4 valor cero).	164
Figura 6.2: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z” (caso de imanes m_1 y m_3 con un valor determinado, imanes m_2 y m_4 valor cero).	166
Figura 6.3: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z" (caso de imanes m_1 y m_3 , con valores regulados, e imanes m_2 y m_4 con valor cero).	168
Figura 6.4: Gráfico representando el campo magnético "B" en relación a la distancia "z" (caso de imanes m_1 y m_3 , con valores regulados, e imanes m_2 y m_4 con valor cero).	168
Figura 6.5: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z” (caso de imanes m_1 y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).	169
Figura 6.6: Gráfico representando el campo magnético B en relación a la distancia “z” (caso de imanes m_1 y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).	169
Figura 6.7: Gráfico representando el campo magnético B en relación a la distancia “z” (caso de imanes m_1 (+170°) y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).	171
Figura 6.8: Gráfico representando el campo magnético B en relación a la distancia “z” (caso de imanes m_1 (-170°) y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).	172
Figura 6.9: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z” (caso de imanes m_1 (+170°) y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).	172
Figura 6.10: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z” (caso de imanes m_1 (-170°) y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).	173

Figura 6.11: Gráfico representando el campo magnético B en relación a la distancia “z” (caso de imanes $m_1 (+90^\circ)$ y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).	174
Figura 6.12: Gráfico representando el campo magnético B en relación a la distancia “z” (caso de imanes $m_1 (-90^\circ)$ y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).	175
Figura 6.13: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z” (caso de imanes $m_1 (+90^\circ)$ y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).	175
Figura 6.14: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z” (caso de imanes $m_1 (-90^\circ)$ y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).	176
Figura 6.15: Fotografía de cuatro imanes colocados en posición dos a dos. Superior e inferior con el rojo hacia la izquierda, los laterales hacia arriba.	177
Figura 6.16: Fotografía de los campos generados por efecto de los cuatro imanes de la figura 6.15.	178
Figura 6.17: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z”. El campo terrestre en dirección Norte igual que la dirección de la proa del buque (caso de imanes $m_1 (180^\circ)$ $m_2 (0^\circ)$ $m_3 (0^\circ)$ y $m_4 (180^\circ)$	179
Figura 6.18: Fotografía de cuatro imanes colocados en posición dos a dos. Superior e inferior con el rojo hacia la izquierda, los laterales hacia abajo.	180
Figura 6.19: Fotografía de los campos generados por efecto de los cuatro imanes de la figura 6.18.	180
Figura 6.20: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z”. El campo terrestre en dirección Norte igual que la dirección de la proa del buque (caso de imanes $m_1 (180^\circ)$ $m_2 (180^\circ)$ $m_3 (0^\circ)$ y $m_4 (0^\circ)$	181
Figura 6.21: Fotografía de cuatro imanes colocados en posición dos a dos. Superior e inferior con el rojo hacia la derecha, los laterales hacia arriba.	182
Figura 6.22: Fotografía de los campos generados por efecto de los cuatro imanes de la figura 6.21.	182
Figura 6.23: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z”. El campo terrestre en dirección Norte igual que la dirección de la proa del buque (caso de imanes $m_1 (0^\circ)$ $m_2 (0^\circ)$ $m_3 (180^\circ)$ y $m_4 (180^\circ)$	183
Figura 6.24: Fotografía de cuatro imanes colocados en posición dos a dos. Superior e inferior con el rojo hacia la derecha, los laterales hacia abajo.	184
Figura 6.25: Fotografía de los campos generados por efecto de los cuatro imanes de la figura 6.24.	184

Figura 6.26: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte igual que la dirección de la proa del buque (caso de imanes m_1 (0°) m_2 (180°) m_3 (180°) y m_4 (0°)).	185
Figura 6.27: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. En los siguientes casos la proa del buque la hemos girado hacia el Este (caso de imanes m_1 (180°) m_2 (0°) m_3 (0°) y m_4 (180°)).	186
Figura 6.28: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Este (caso de imanes m_1 (0°) m_2 (0°) m_3 (180°) y m_4 (180°)).	187
Figura 6.29: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Este (caso de imanes m_1 (180°) m_2 (180°) m_3 (0°) y m_4 (0°)).	187
Figura 6.30: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Este (caso de imanes m_1 (0°) m_2 (180°) m_3 (180°) y m_4 (0°)).	188
Figura 6.31: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Sur (caso de imanes m_1 (180°) m_2 (0°) m_3 (0°) y m_4 (180°)). Y los	189
Figura 6.32: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Sur (caso de imanes m_1 (180°) m_2 (180°) m_3 (0°) y m_4 (0°)).	190
Figura 6.33: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Sur (caso de imanes m_1 (0°) m_2 (0°) m_3 (180°) y m_4 (180°)).	191
Figura 6.34: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Sur (caso de imanes m_1 (0°) m_2 (180°) m_3 (180°) y m_4 (0°)).	191
Figura 6.35: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Oeste (caso de imanes m_1 (180°) m_2 (0°) m_3 (0°) y m_4 (180°)).	193
Figura 6.36: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Oeste (caso de imanes m_1 (0°) m_2 (0°) m_3 (180°) y m_4 (180°)).	193

Figura 6.37: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Oeste (caso de imanes m_1 (180°) m_2 (180°) m_3 (0°) y m_4 (0°)).....194

Figura 6.38: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Oeste (caso de imanes m_1 (0°) m_2 (180°) m_3 (180°) y m_4 (0°)).....195

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades de los materiales magnéticos compuestos de tierras raras de calidad Nd35 y Sm ₂ Co ₁₇	92
Tabla 2: Relación B/H para el AlNiCo 500.....	93
Tabla 3: Propiedades del AlNiCo 500.....	94
Tabla 4: Resultados teóricos de corrección máxima.....	198
Tabla 5: Resultados teóricos de corrección mínima.....	201
Tabla 6: Resultados prácticos de corrección máxima.....	203
Tabla 7: Resultados prácticos de corrección mínima.....	204

LISTA DE ACRÓNIMOS

ARPA	Automatic Radar Plotting Aid
CMI	Compás Magnético Integral
DECCA	Sistema de navegación desarrollado por “DECCA Radio and Televisión, Ltd.”
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Position System
IMO	International Maritime Organization
JRC	Japan Radio Co., Ltd.
LORAN	Long Range Radio Aids to Navigation
NLR	Naval Research Laboratory
NMEA	National Marine Electronics Association
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
SOLAS	Safety Of Life At Sea
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
TMC	Transmitting Magnetic Compass
CGS	Cegesimal
NAVSPASUR	The Naval Space Surveillance network
NLR	Naval Research Laboratory
LFTI	Leningrad Physical Technical Institute
NSA	National Security Agency
AlNiCo	Imanes de composición de Aluminio, Niquel y Cobalto

LISTA DE ABREVIATURAS

m	Momento magnético en Am^2 .
B	Campo magnético en μT (miliTesla).
r	Distancia imán a <i>fluxgate</i> (sonda).
B_r	Campo magnético en coordenada polar (r, θ) .
B_θ	Campo magnético en coordenada polar (r, θ) .
μ_0	Permeabilidad magnética del vacío.
\hat{i}	Vector unitario en dirección x .
\hat{j}	Vector unitario en dirección y .
\hat{k}	Vector unitario en dirección z .
\vec{B}_1	Campo magnético generado por el imán 1.
\vec{B}_2	Campo magnético generado por el imán 2.
\vec{B}_3	Campo magnético generado por el imán 3.
\vec{B}_4	Campo magnético generado por el imán 4.
\vec{B}_T	Campo magnético total de los cuatro imanes.
\vec{m}_1	Vector momento magnético del dipolo 1.
\vec{m}_2	Vector momento magnético del dipolo 2.
\vec{m}_3	Vector momento magnético del dipolo 3.
\vec{m}_4	Vector momento magnético del dipolo 4.
\vec{r}_1	Vector desde dipolo 1 hasta punto de afección P .
\vec{r}_2	Vector desde dipolo 2 hasta punto de afección P .
\vec{r}_3	Vector desde dipolo 3 hasta punto de afección P .
\vec{r}_4	Vector desde dipolo 4 hasta punto de afección P .

\vec{a}_1	Posición del dipolo 1 en el plato.
\vec{a}_2	Posición del dipolo 2 en el plato.
\vec{a}_3	Posición del dipolo 3 en el plato.
\vec{a}_4	Posición del dipolo 4 en el plato.
P	Punto donde se calcula el campo generado por los dipolos. Coordenadas x, y y z .
r_1	Módulo de \vec{r}_1 .
r_2	Módulo de \vec{r}_2 .
r_3	Módulo de \vec{r}_3 .
r_4	Módulo de \vec{r}_4 .
r_1^3	Exponencial del módulo de \vec{r}_1 .
r_1^5	Exponencial del módulo de \vec{r}_1 .
r_2^3	Exponencial del módulo de \vec{r}_2 .
r_2^5	Exponencial del módulo de \vec{r}_2 .
r_3^3	Exponencial del módulo de \vec{r}_3 .
r_3^5	Exponencial del módulo de \vec{r}_3 .
r_4^3	Exponencial del módulo de \vec{r}_4 .
r_4^5	Exponencial del módulo de \vec{r}_4 .
ϑ_1	Ángulo de giro del imán 1.
ϑ_2	Ángulo de giro del imán 2.
ϑ_3	Ángulo de giro del imán 3.
ϑ_4	Ángulo de giro del imán 4.
θ	Ángulo de corrección de la aguja magnética.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1.- Presentación

El origen de esta tesis se justifica por la necesidad del autor de obtener el doctorado por exigencias de un Convenio Internacional, que especifica que los docentes deben estar en posesión de dicho título, para poder impartir docencia en las diferentes Universidades.

Como Capitán de la Marina Mercante española, y a la vista de ese gran compromiso, se me plantea el dilema de la elección del tema (cosa nada fácil como marino), así pues el investigador, ayudado por las opiniones de compañeros de docencia, tomó la decisión de abordar algo nuevo como pudiera ser un sistema de compensación simplificado de la aguja magnética, con la idea de aportar un claro avance hacia la modernización de un sistema de orientación como es la aguja náutica que permanecerá en el tiempo como equipo indispensable de la navegación.

En un principio, no es que este tema fuera el de mayor interés para el autor, que tras haber dedicado quince años de su vida como marino mercante en distintas graduaciones de oficial de cubierta, sus preferencias hubieran desembocado en otros ámbitos de interés distintos de los abarcados en la presente tesis, sobre cuestiones mucho más relacionadas con las labores propias del trabajo práctico a bordo de un buque mercante.

El campo de nuestra elección es un terreno para el cual los marinos se preparan, especialmente en los últimos cursos de sus estudios, aunque no genera demasiado interés. Esto es debido a que la opción de la compensación siempre se ha relegado al saber hacer de los compensadores, siendo profesionales específicos en tierra quienes se dedican a estas funciones. No teniendo la obligatoriedad de que dichas funciones sean efectuadas exclusivamente por compensadores.

Con todo esto la parte técnica y práctica de la compensación, estaba en la mente casi olvidada, pero gracias a la insistencia del director de tesis, tras mucho pensar y darle vueltas, se decidió por este tema en concreto.

Reconociendo que ha llegado a hacersele interesante incluso apasionante a medida que avanzaba la investigación, esperanzado en que resultase de gran utilidad para la gente de mar, que como él mismo reconoce, jamás se le ha dado el especial reconocimiento que el compás magnético ha merecido. Aún más si cabe en la actualidad debido a la creciente influencia de los sistemas electrónicos que se creen más fiables pero que, a la postre, presentan problemáticas generalizadas y comprometidas.

1.2.- Motivo de la Tesis

Este trabajo: presenta, analiza y concluye un sistema que a futuro puede, incluso, transformarse en automático, aunque ahora únicamente se pretenda sentar las bases de cómo resulta funcional, sencillo y de fácil manipulación a nivel operativo, ofreciendo al mismo tiempo unos resultados correctos en cuanto a solventar la compensación en cualquier circunstancia.

Se intenta, de alguna manera, hacer que la compensación sea más sencilla para aquellos profesionales que no se consideren con la habilidad suficiente o que no recuerdan los cálculos para realizar dicha compensación. Resolviendo un problema inmediato que es el de compensar la aguja magnética de una manera fácil y eficaz sin necesidad de tener grandes conocimientos de la física necesaria para dicha corrección. Esta ha sido desde un primer momento una de las bases de nuestra tesis ya que deseamos que los resultados que emanen de la misma, sirvan de aplicación en plazos muy breves de tiempo en la compensación a bordo de buques.

Nuestra labor les facilitará, de una manera nueva y distinta a la convencional que se viene utilizando desde el siglo XIX, mediante la situación de unas varillas magnéticas en diferentes celdas en relación a la cuantía de corrección a generar, para mantener la aguja magnética, aguja de marear, brújula o como se la quiera identificar, lo más exacta a la orientación verdadera o real en la que tiene que estar, que es marcando directamente al Norte Magnético.

Al final y a medida que ha avanzado en el proceso de investigación, a pesar de haber tenido que lidiar con serios problemas, al final ha prevalecido la satisfacción de haber podido llevar a buen puerto, nunca mejor dicho, todo el trabajo con la finalidad de facilitar al marino la labor de la compensación y mantenimiento de dicha aguja náutica.

Para ello el investigador ha construido y probado un artefacto, de invención y construcción propia que difiere en utilización y efectividad, aunque no sustancialmente, del sistema de compensación aún vigente. Hemos constatado que nuestra construcción es más exacta que el estándar utilizado, debido a la

posibilidad de fijación de los imanes en cualquier posición y a cualquier distancia, cuestiones ambas de importancia para poder realizar una compensación óptima.

Todo esto, a modo de hardware, se ha complementado con un software conocido de nuestro Amigo y compañero informático Ricardo López. Las pruebas de laboratorio y el funcionamiento de las mismas se han realizado por medio de la funcionalidad del sistema y de los parámetros estudiados.

Esto lo ha realizado en computadora otro Amigo y compañero, Alfredo, de la UPV/EHU. En ella se ha escrito la fórmula adaptada a dicho efecto para poner a prueba mediante un programa de MatLab, que mi compañero Alfredo maneja perfectamente, dentro del cual se ha escrito la fórmula utilizada para crear o simular situaciones distintas de acuerdo al posicionamiento de los distintos imanes de compensación.

Se han realizado cálculos teóricos para definir la efectividad y la exactitud de la corrección de los imanes compensadores, en qué posiciones y distancias, para fijar el artefacto desarrollado, en un buque y para asegurar la comparación de los resultados físicos de campo con los del laboratorio, concluyendo finalmente con una exposición de los resultados obtenidos.

Se ha intentado obtener información sobre la materia en cuestión, en casi todos los ámbitos informativos, artículos, convenciones etc. y en todos los espectros geográficos, con un resultado negativo. Cabe decir que lo más reciente en el tiempo se remite a tres tesis redactadas en las últimas dos décadas [46] [47] [79].

Existe un vacío total, del tipo de investigación realizada, en el ámbito mundial, probablemente debido a que actualmente la aguja magnética ha perdido peso de interés general con relación a las nuevas tecnologías electro-electrónicas, con lo que se ha hecho complicado, por no decir imposible, encontrar bibliografía relacionada con el tema de la tesis.

1.3.- Estado de la Técnica

Tomamos como origen en nuestra investigación, preguntas históricas sobre la aguja magnética¹ y de los antecedentes tecnológicos relacionados con el tema de la compensación magnética². A pesar de la escasa literatura, relativa a esta materia, abordamos esta deficiencia con la creación de este sistema de compensación simplificada del desvío semicircular para una bitácora con compás de clase "A".

Se da por hecho que se han producido grandes avances en cuanto al estudio del geomagnetismo dando lugar a diferentes teorías en cuanto a su generación y del origen de la declinación magnética, punto conocido desde hace varios siglos, pero aun hoy sin tener una teoría unificada de su origen [37][38][67]. De esta primera parte se realizan cálculos aproximados de dicha declinación para periodos de tiempo de cinco años ya que debido a su inexactitud no se pueden realizar cálculos más ajustados para periodos más amplios de tiempo.

Relegando los estudios y teorías en cuestión de magnetismo anteriores al siglo XX tenemos que remitirnos a lo más reciente que representa al estudio diferenciado de lo que ha significado la aguja magnética en el tiempo.

Si miramos las referencias existentes hasta el momento, vemos, que aún siendo un instrumento indispensable para la navegación exigido de forma obligatoria por la OMI, llama la atención que no haya variado prácticamente nada, ni en su construcción ni en su funcionamiento, desde los tiempos en que se descubrieron y conocieron los efectos de los hierros de los buques de construcción de acero, aunque bien es cierto que los marinos ya vislumbraban que algo, en los buques de madera, también afectaban al correcto funcionamiento de las agujas.

Verdad es, que sí hay referencias a nuevos sistemas de corrección de desvíos, nuevos sistemas eléctricos etc. pero fundamentalmente en lo que se refiere a una compensación en el sentido clásico de la palabra no hay nada específico. Con esto solo quiero indicar lo que ya se repite a lo largo de la tesis, basado todo el sistema

¹ Para la bibliografía fundamental de este tema véase capítulo 2

² Para consultar esta bibliografía véase capítulo 3

en imanes y no en electroimanes u otro sistema técnico del mismo tipo que dependa en última instancia de una fuente energética para corregir los desvíos producidos, por los hierros de los buques, sobre la aguja magnética.

Por lo tanto aunque parezca extraño lo más actual en este tema lo aportan tres Tesis doctorales y una patente reciente de la UPV/EHU.

Una tesis y una patente llegan de la mano de un profesor de Escuela de Náutica, el Capitán y Doctor (Ph. D.) Aitor Martínez Lozares [79]. Su tesis del año 2008, es también lo más reciente escrito con respecto a la aguja magnética.

Otra de las Tesis, del año 2003 del Doctor (Ph. D.) Pedro Gea Vázquez [47]. Y una tercera tesis, del año 1999, y la más distante en el tiempo, también del profesor de la Escuela de Náutica, el Capitán y Doctor (Ph. D.) Ricardo Gaztelu-Iturri Leizea [46].

El Doctor (Ph. D.) Gaztelu-Iturri realizó su tesis asentada en una modificación del cálculo de la compensación preliminar, que se basó en la simplificación de éste, para facilitar, y lo pudiera realizar de la manera más sencilla, a cualquier marino que se encontrara en la circunstancia obligada de tener que compensar una aguja magnética. Gaztelu-Iturri resumió todas las ecuaciones aproximadas a una serie corta de ellas para poder realizar la compensación sin tantos cálculos matemáticos como se acostumbraba a estudiar en las escuelas de náutica, y que en los últimos tiempos y debido a la irrupción de los sistemas satelitales, GPSs, etc. se estaban relegando al olvido.

De todo esto surgió la denominada compensación reducida de la aguja náutica que se observo era tan eficaz como el sistema convencional que emanaba de cálculos matemáticos del siglo XVIII, y que simplemente precisaba de muchas menos lecturas durante el borneo del buque y por consiguiente, simplificaba a menos operaciones matemáticas para el cálculo de los desvíos de la aguja magnética.

El Doctor Gea-Vázquez conformo su tesis en relación a la sustitución de los imanes de compensación de escora, que se colocan en una cápsula portante, por una esfera que tuviera el mismo efecto que dichos imanes destinados a tal fin.

Los imanes de compensación de la escora son de fabricación de hierro duro, es decir permanentes, y se iban a sustituir por una esfera de hierro dulce, para compensar, en principio, los desvíos producidos, en la aguja magnética, por la escora de un buque y a su vez que no generara ninguna fuerza magnética inducida sobre los imanes existentes—encargados de la compensación, y que existen en toda bitácora que soporta la aguja magnética. Los buques mercantes navegan en situación adrizada, salvo alguna excepción, con lo que la parte correspondiente a la escora se va a obviar aunque sí hay que mencionar su importancia en los buques de vela que por acción del viento navegan en condiciones de escora.

La evolución más reciente y quizás con más impacto o repercusión mediática, ha sido la tesis del Doctor Martínez Lozares, que con su investigación ha conseguido, además de una tesis interesantísima, generar una patente que implica una mejora sustancial y un nuevo horizonte en el sistema de calcular los desvíos de la aguja náutica, todo ello calculado en tiempo real por medio de un algoritmo que a la postre nos realiza el cálculo completo de los coeficientes del desvió y por ende la propia curva de desvíos, a los diferentes rumbos a los que navega el buque. Para el cálculo de estos desvíos no es necesario generar una pérdida de tiempo como en el sistema convencional del proceso del cálculo de los desvíos de una aguja magnética añadidos al tiempo necesario en realizar el borneo para la obtención de datos a los diferentes rumbos.

La patente, denominada CMI compass, es un equipo que en funcionamiento constante mientras el buque navega en su operatividad habitual, va capturando datos de diversos instrumentos del buque y realiza un estudio pormenorizado, en tiempo real, de los distintos tipos de rumbos a los que se aproa el buque, y los desvíos a dichos rumbos, los guarda en memoria para recuperarlos si fuese necesario para su posterior aprovechamiento.

Por lo tanto podemos decir que este nuevo sistema ahorra tiempo y dinero en la operación del cálculo de los desvíos, puesto que esta operación suele consumir dos o tres horas para bornear y calcular los desvíos del buque a al menos cinco rumbos distintos a los que se navega durante el borneo del buque.

Tenemos por lo tanto, después de muchos años, un sistema fiable al proporcionarnos en una de sus variantes la resta aritmética a la décima, centésima

o milésima de grado, quedando así exento de los posibles errores matemáticos que se producen en la realización del ajuste de nuevos desvíos de la aguja magnética.

La reglamentación internacional obliga a todos los buques a certificar sus agujas o compases magnéticos cada cuatro años, además de que el desvío de la aguja no debe ser mayor de 3° a cualquiera de los rumbos (para buques de eslora superior a 89,5 metros), y 4° (para buques de eslora igual o inferior a 89,5 metros). Si estos desvíos sobrepasaran de los 3° o 4° habría que realizar una nueva compensación de la aguja.

Con todo esto mi pretensión es también la de aportar algo nuevo, útil, y de sencilla utilización en el caso de que la aguja del buque se encuentre fuera del rango de seguridad exigido, y además como equipo obligado para la seguridad del buque que debe estar siempre a punto, cualquier oficial sea capaz de realizar una compensación con la garantía de que el ajuste que realiza sea el correcto, evitando el engorro de los cálculos matemáticos que habría que realizar si no dispusiéramos de este sistema.

CAPÍTULO 2

EVOLUCIÓN EN LA ORIENTACIÓN DE LOS BUQUES

2.1.- Evolución histórica de la aguja magnética

El origen de la aguja magnética es un punto, todavía, no clarificado por lo que en tiempos venideros puede que se vayan realizando nuevos descubrimientos que esclarezcan su origen y autoría. De momento todo es confuso con intencionalidades partidistas que generan controversias, siempre con resultados efímeros.

Debemos de tener en cuenta que, en la noche de los tiempos, la aguja magnética como tal no existía y cuando se comenzó a utilizar la piedra imán y la aguja, no hubo quien lo anotara en ningún documento. De ahí la dificultad de ubicación de este descubrimiento, de tanta importancia en el devenir de la historia.

Tenemos conocimiento de ciertas dataciones originadas en traducciones de escritos de diversa índole, siempre vagas y sin posibilidad de corroborar. Esto ha generado gran cantidad de hipótesis muchas de las cuales, a la larga, se han desechado por falta de rigurosidad.

En primer lugar tenemos que tener en cuenta que el origen de la aguja magnética se deriva de la utilización de la roca magnetita y de su capacidad de orientarse en dirección norte-sur debido a la influencia de atracción del magnetismo terrestre. Atracción esta conocida desde la antigüedad, en diferentes épocas y en diferentes lugares. Se admite, debido a los hallazgos arqueológicos realizados, que pudo ocurrir en continentes separados y a priori sin ninguna relación entre ellos. Comenzando así la disyuntiva de quien fue el primero en utilizar la magnetita o piedra imán en la historia.

A medida que va pasando el tiempo se van realizando nuevos descubrimientos al respecto, creando un nuevo escalafón de ubicaciones geográficas e históricas que hacen que las fechas aceptadas hasta la actualidad, se tengan que alterar nuevamente debido a dichos descubrimientos.

Así pues, aunque en este momento se continúen secuenciando una serie de fechas y datos contrastados, y que a corto plazo no aparezcan nuevos datos que rompan la tónica aquí descrita, hay muchos cabos sueltos que sin duda, darán lugar a una

nueva reescritura de la evolución del magnetismo y por tanto de la aguja magnética, y a una nueva cronología de los hechos históricos.

Debido a los fines que perseguimos no vamos a entrar a clarificar quien fue el primer descubridor de la piedra imán o el primero que le dio usos cotidianos, sino que intentaremos dar una cronología clara, de acuerdo a puntos demostrados, y sin profundizar en la controversia de quien fue el primero en utilizarla.

Hay que hacer una clara identificación inicial entre lo que se denomina piedra imán, la aguja imantada o trozo de hierro imantado, el compás magnético, utilizado en las navegaciones desde su invención, y la brújula, instrumento definido como de utilización terrestre.

La primera era un trozo de magnetita sobre el que ejercía una atracción sobre el hierro. En un principio se utilizó directamente la piedra para manufacturar piezas que se utilizaban directamente y después de su manufactura se utilizaba la pieza como elemento orientador que estaba influenciado por el geomagnetismo [94].

La segunda, el trozo de hierro imantado, con el tiempo se transformó en la aguja flotante que indicaba a las gentes de mar la dirección de navegación entre distintos puntos de comunicación pero, a pesar de su uso, no se le puede llegar a identificar con la aguja magnética, sino como perfeccionamiento del hierro imantado [94].

El tercero, denominado compás magnético no tuvo su invención hasta alrededor del año 1300 en que se afirma, aunque no hay ninguna evidencia de que así fuera, que fue un marino de Amalfi (Italia) el que realizó su invención casi como el compás que hoy conocemos [94].

Aunque en un principio todos daban como buena la autoría china de la utilización de la magnetita, actualmente todo apunta que fueron los Olmecas quienes ya hacían uso de las propiedades de la piedra imán unos mil años antes que los pobladores chinos, utilizándola en sus mediciones como un instrumento de direccionamiento, y no como instrumento de navegación en la mar u orientación en tierra.

En el estudio de las propiedades de M-160 y más tarde la interpretación de ellos para reconstruir la función original del artefacto...El análisis de M-160 indica que los olmecas podían haber descubierto y utilizado la brújula geomagnética piedra imán anterior a 1000 a.C. [19].

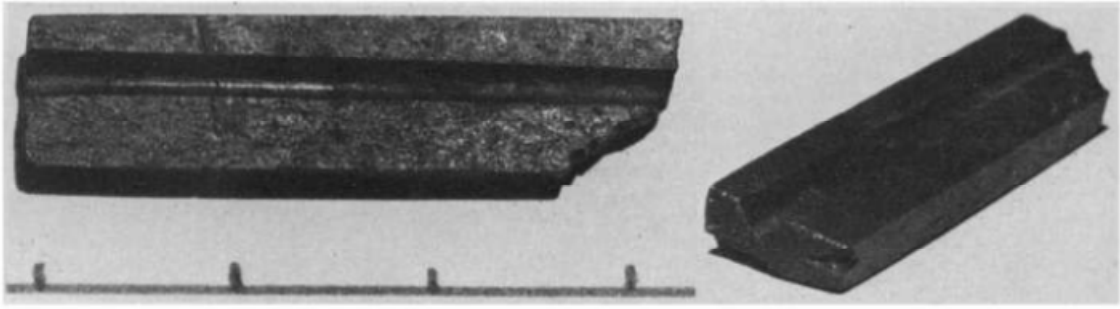


Figura 2.1: Fotografías del artefacto Olmeca M-160 con una escala en cm.

Fuente: CARLSON, J.B.

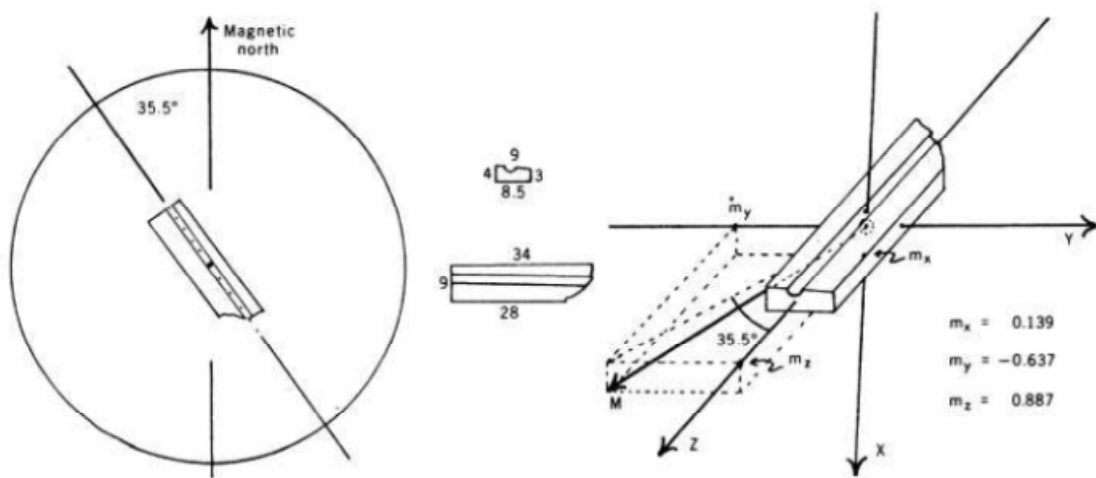


Figura 2.2: (Izq.) Vista en planta y alzado del M-160 (dimensiones en milímetros) y representación del experimento flotante mostrando la orientación observada de $35,5^\circ$ al oeste del norte magnético. (Dcha.) Vector M y componentes del momento magnético total del M-160. La dirección de M es el de búsqueda del polo norte, y - z es el plano de flotación del M-160, y el eje z es paralelo a la ranura incisa. El artefacto no está dibujado a escala ni a proporción exacta. Fuente: CARLSON, J.B.

En realidad no es que el resto arqueológico olmeca sea un compás magnético, sino que solo ofrece una orientación.

Al llamar a la piedra imán brújula de orden cero me refiero a la utilización de sus propiedades de auto-orientación sin conocimiento de su tendencia a señalar el norte-sur. En este sentido, no es una verdadera brújula [19].

Después de muchas mediciones y análisis se ha llegado a conjeturar, que la funcionalidad de dicho artefacto, podría haber sido la de direccionamiento,

utilizándose para alineamiento de las edificaciones de la ciudad y para la orientación de edificios de culto en la cultura Olmeca.

Es cierto que aún siendo conjeturas, el resto arqueológico es únicamente una parte, pero extrapolando la capacidad magnética del mismo al posible tamaño que hubiese podido tener el artefacto original completo, bien se puede concluir que pudo ser usado como una verdadera herramienta de alineación.

El campo geomagnético fue un descubrimiento muy posterior en China y en el mundo occidental [19].

También hay que referirse a otras muestras en el mismo sentido como las halladas en México y Guatemala, comentadas por Guimarães [49].

Por otra parte está el descubrimiento y el uso de la piedra imán y sus derivaciones en la civilización China. Aclararé algunas cuestiones de manera somera, al existir una extensa bibliografía al respecto.

La propiedad de la piedra imán era conocida por los chinos desde tiempos prehistóricos, en los principios geománticos del Feng-Shui y en artes adivinatorias de los magos imperiales donde podrían estar los principios de la aguja magnética.

La historia de la brújula magnética en China se ha revolucionado recientemente por las contribuciones de Wang Chen que ha sido capaz de explicar un texto fundamental en el *Lun Heng* (siglo I) y revelando una probable conexión entre el compás magnético y la tabla de adivinación de la gente del periodo Han...que la brújula original china era probablemente una especie de cuchara cuidadosamente tallada de una piedra imán y que giraba sobre la superficie lisa de la tabla de un adivino [94].

El Feng-Shui se leía en una tabla originaria de madera dura, o mejor de bronce pulido, que representaba la Tierra y otro tablero superior de magnetita, pulido perfectamente, representando el cielo y las divinidades y que se orientaba por efecto del magnetismo terrestre. En su centro llevaba dibujada la constelación de la Osa Mayor¹. La tabla superior, con el tiempo, se convirtió en una especie de cuchara, debido a su similitud con la Osa Mayor². Debido a la peculiaridad del

¹ La Osa Mayor que aparece en las primeras tablas se identifica por su direccionamiento con su parte de la "cabeza" hacia el Sur y la parte del cuerpo hacia el Norte.

² Dicha cuchara también se construía de piedra imán, siempre teniendo en cuenta el direccionamiento de la piedra imán utilizada en su fabricación, el asa estaba direccionada al Sur y la concavidad de la cuchara al Norte. El mango de la cuchara es la imagen de la cabeza de la Osa Mayor o carro, que indicaba el Sur, mientras que la cuchara en sí, se asemejaba al cuerpo de la Osa Mayor o carro, tal como

diseño en la fabricación de dicha cuchara, esta se orientaba hacia el Sur, que era la dirección menos adversa siendo el Norte el indicador del frío, la oscuridad, etc., es decir, de todo lo desdeñable.



Figura 2.3: La placa lacada, es una reconstrucción del original en bronce, que data del siglo IV a.C., realizada por Wang Chen-To que se exhibe actualmente en el Museo de Historia China en Pekín.

No se han encontrado ni tableros, ni cucharas originales indicadoras del feng-shui, con lo cual no disponemos de una prueba fehaciente de este artefacto, aunque se supone que la cuchara estaba construida de piedra magnetita pulida para que tuviera el mínimo rozamiento y pudiera girar por efecto del momento magnético terrestre. A partir de este indicador del Sur se cree que surgieron todas las evoluciones posteriores de la brújula.

lo hemos visto siempre. De esta manera el mango de la cuchara siempre se orientaba hacia el lado bueno que era el Sur.

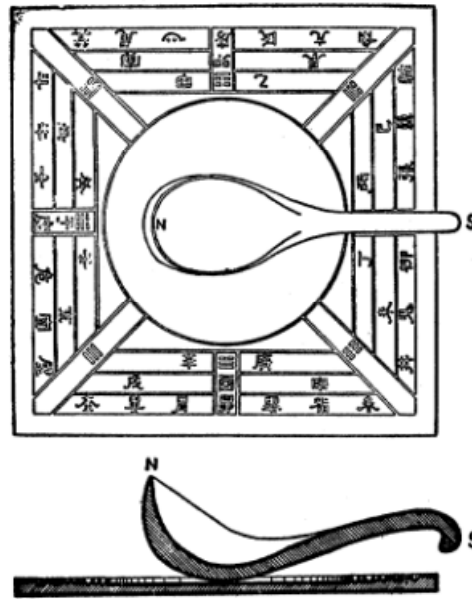


Figura 2.4: Placa-terrestre y piedra imán: reconstrucción esquemática de Wang Chen-To (Wang Zhen-Do) que muestra cómo la forma de la cuchara permite la rotación sobre su concavidad en respuesta a la atracción magnética.

En un principio se había aceptado “un carro indicador del sur” como el primer indicio de indicador del Sur, aparentemente un instrumento accionado magnéticamente que indicaba el Sur y que en realidad más que un instrumento o mecanismo funcional relativo al magnetismo, se ha comprobado, sin lugar a dudas, que este carro era un invento mecánico que se auto compensaba a base de engranajes y que siempre indicaba el Sur [95].

Este carro lo define ampliamente Needham como un artefacto mecánico que mantiene su posición por medio de una serie de engranajes acoplados a las ruedas del mismo.

[...] ahora consideramos establecido sólidamente que el carro que señala al sur no tenía nada que ver con el direccionamiento magnético. De hecho, era esencialmente un dispositivo de auto-regulación, que implica un sistema de engranajes-ruedas de modo que el puntero mantendría una dirección fija original continuamente compensando cualquier excursión del vehículo fuera de esa dirección. Por lo tanto, corresponde a la parte de la ingeniería [...] [94].

Tenemos por lo tanto suficientemente claro que el “carro” como tal, no es la versión magnética de indicación del punto cardinal Sur.



*Figura 2.5: Carro indicador del Sur. (Modelo de George H. Lanchester de 1947).
Museo de la Ciencia de Londres.*

Tal vez el trabajo más notable que jamás ha dedicado un erudito occidental a la aguja magnética fue la carta dirigida a Alexander Humboldt por J. Klaproth en 1834, muchas de sus conclusiones se mantienen aun en nuestros días. Pero como todas las discusiones del siglo XIX, estaba viciado de errores en la diferenciación del “carro apuntador del sur” y la aguja magnética propiamente dicha. H.A. Giles fue probablemente el primero en realizar una radical distinción entre ambos, y demostrar que el primero era un artificio puramente mecánico [94].

Aún así, solo estaríamos en el inicio del conocimiento de la incidencia del magnetismo, aunque limitado a su utilización en tierra, mientras que su utilización marítima devendría con posterioridad y debido a una evolución de estos primeros objetos orientables utilizados en tierra.

La referencia más antigua de la atracción del hierro por el imán se sitúa entre el año 403 y el 221 a.C.

Li Che-tchen añadió que si esta piedra no tenía amor para el hierro, no le atraería hacia ella. Klaproth, en su carta sobre la invención de la brújula, supone que la palabra francesa “aimant” no es más que una traducción del “ts'eu” chino.

En China se conocía el imán natural o piedra imán, y su fuerza de atracción desde la más remota antigüedad. Hay un pasaje en el *Liu-che-tch'ouen-ts'ieou*, obra compuesta en el período de los Reinos Combatientes (403-221 a.C.), bajo los auspicios de Liu Pou-wei, primer ministro de Ts'in: “La piedra imán hace venir al hierro o lo atrae.”

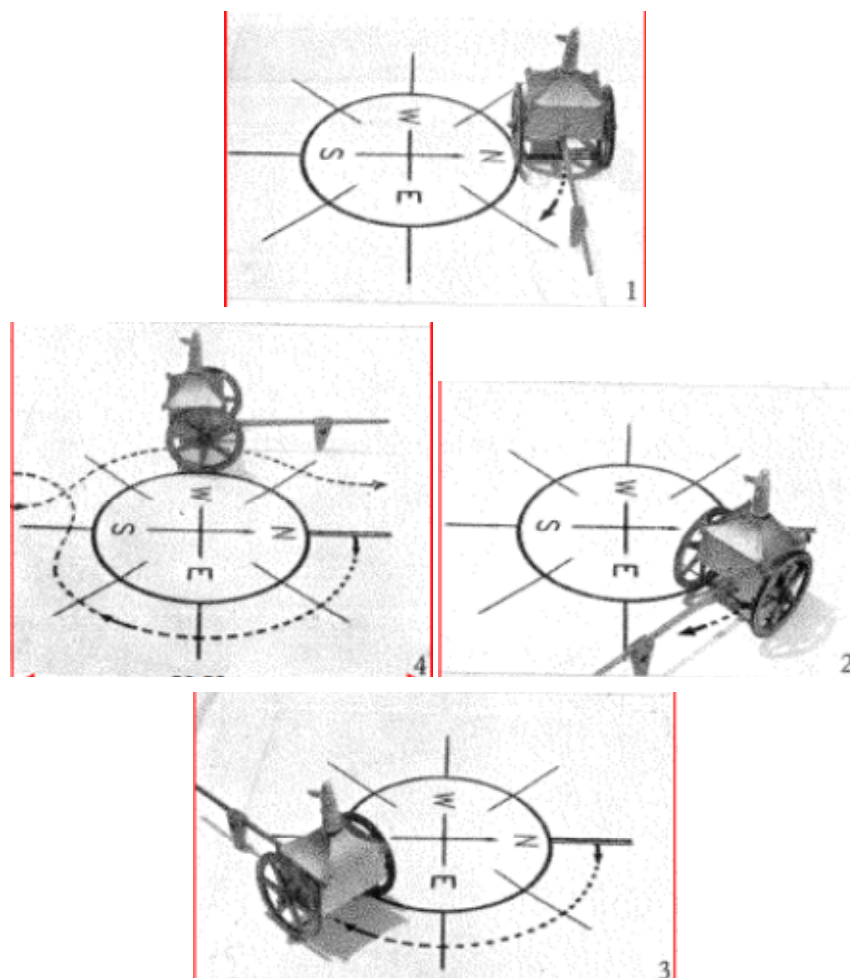


Figura 2.6: Fotografías de acción mostrando la eficiencia de la reconstrucción del mecanismo de engranaje diferencial del carro señalador del Sur (de Mr. George H. Lanchester). Fuente: NEEDHAM, J.

Esta es la referencia más antigua que se puede encontrar en la literatura china sobre la atracción de hierro por el imán³.

Mientras, en Europa, se tenía conocimiento de la atracción de la piedra imán desde tiempo de Tales...

³ «Li Che-tchen ajoute que si cette pierre n'avait pas un amour pour le fer, elle ne le ferait pas venir à elle. Klaproth, dans sa lettre sur l'invention de la boussole, suppose que le mot français "aimant" n'est qu'une traduction du chinois "ts'eu".

On a connu en Chine l'aimant naturel, ou la pierre d'aimant, et sa force attractive dès la plus haute antiquité. On trouve un passage dans le Liu-che-tch'ouen-ts'ieou, ouvrage composé à la période des Royaumes Combattants (403-221 avant J.-C.) sous les auspices de Liu Pou-wei, premier ministre des Ts'in: La pierre d'aimant fait venir le fer ou elle l'attire".

C'est la plus ancienne mention qu'on puisse trouver "dans la littérature chinoise concernant l'attraction du fer par l'aimant. » LI SHU-HUA. (1954). Origine de la Boussole II. Aimant et Boussole. *Isis*, 45 (2), 175.

La observación más temprana con respecto al imán se supone la realizada por Tales (siglo VI a.C.) que lo explica en términos animísticos, pero eso ha llegado hasta nosotros a través de una cita de Aristóteles (siglo IV a. C.). En el siglo V a. C. Empedocles y Diógenes de Apolonia también mencionaron el imán, pero aquí otra vez tenemos que confiar en la tradición citada por Alexander de Afrodisias, que vivió a comienzos del siglo III [93].

pero no de la capacidad de orientación del mismo.

Hay que tener en cuenta que aun cuando en la antigüedad se utilizó la magnetita, no fue hasta bastantes siglos posteriores cuando en realidad se usó como instrumento directriz para la navegación. Por lo tanto, el tener conocimiento de las propiedades tractoras de la magnetita sobre agujas de hierro no indicaba que los conocimientos sobre el magnetismo estuvieran tan desarrollados como para que se inventara de la noche a la mañana la aguja náutica.

Según los más entendidos en estas cuestiones, para saber qué fue lo que ocurrió en realidad en China, debemos tomar como muestra el texto básico de Shen Kua en el *Mêng Chhi Pi Than*, que fue escrito hacia el año 1088, entre 1050 y 1090 [68], es decir un siglo antes que la primera mención europea sobre un compás magnético [94].

Aquí tenemos, no sólo la más temprana, clara e innegable descripción del compás de aguja magnética descrita en cualquier idioma, sino también una clara definición de la declinación magnética [68], la cual antecede en mucho tiempo a la primera mención de Colón en el año 1492.

Los magos frotan la punta de una aguja con la piedra imán; entonces es capaz de apuntar hacia el sur. Pero siempre se inclina ligeramente hacia el este, y no apunta directamente al Sur (*jan chhang wei phien, pu chhüan nan yeh*). (Puede hacerse para) flotar sobre la superficie del agua, pero entonces es más bien inestable. Puede equilibrarse en la uña, o en el borde de una taza, donde se puede hacer que gire más fácilmente, pero estos apoyos siendo duros y lisos, la aguja es susceptible de caerse. Lo mejor es suspenderlo de una sola fibra de capullo de seda nuevo unido al centro de la aguja por un pedazo de cera del tamaño de un grano de mostaza—entonces, colgando en un lugar sin viento, siempre apuntará hacia el sur.

Entre estas agujas hay algunas que, después de ser frotadas, apuntan al norte [94].

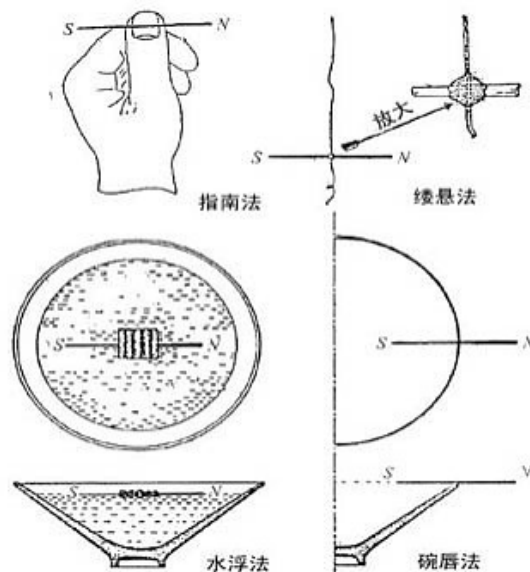


Figura 2.7: [Leer verticalmente] 1. La aguja se coloca sobre la uña de un dedo. 2. Aguja colocada en el agua (Se pasa por una mecha). 3. Aguja suspendida por un hilo unido con una gota de cera. 4. Aguja colocada en el borde de un recipiente.
— Experiencias con la aguja imantada descritos en el *Mêng Chhi Pi Than* (1089-1093). Diseños realizados por Wang Chen-To. Fuente: SHU-HUA L.

Podemos encontrar una de las primeras definiciones claras de lo que es un compás húmedo hacia el año 1116:

Khou Tsung-Shih en su libro *Pên Tshao Yen I* (El Significado dilucidado de la Farmacopea) dice lo que desde hacía mucho se suponía fue la primera descripción conocida de la aguja húmeda, tan característica de todas las citas más antiguas (pero posteriores) de los europeos.

[...] Una vez más, si se perfora un pequeño trozo de mecha (médula de junco, mechas de junco eran comunes en China) transversalmente con esta aguja, y se le hace flotar en el agua, también apuntará hacia el sur, pero siempre se inclina (al este) hacia el punto Ping del compás (es decir S 15 ° E) [106].

En la actualidad sabemos que Khou Tsung-Shih estaba lejos de ser el primero en definir el compás de agua o flotante. Hasta el momento en que Wang Chen-To lo señaló, todos habían obviado un pasaje de un gran compendio de tecnología militar el *Wu Ching Tsung Yao* que fue finalizado hacia el año 1044 y que dice:

[...] o también hacían uso del carro que señala al sur, o el pez que señala al sur (*chih nan yü*) para identificar las direcciones. [...] pero en el método del pez se corta una delgada hoja de hierro con la forma de un pez dos pulgadas de largo y media pulgada de ancho, que tiene una cabeza en una punta y la cola en la otra. [...] con lo cual su cabeza apuntará al sur (literal en la dirección *Wu*) [94].

Es en esta época cuando aparece por primera vez la identificación de una aguja magnética en forma de pez.

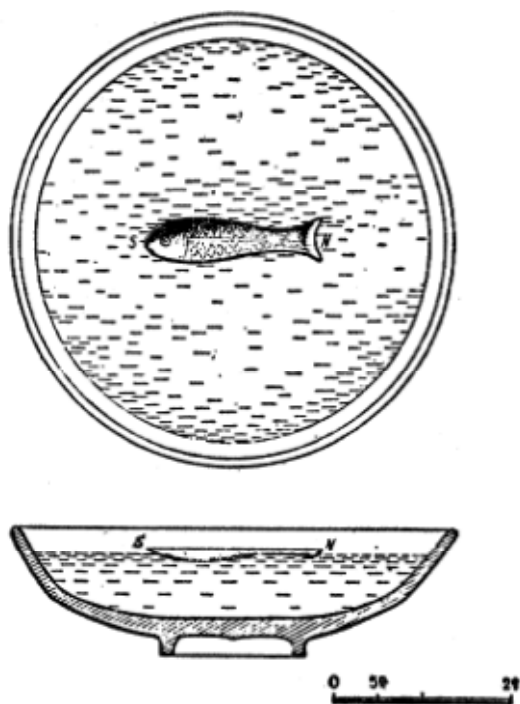


Figura 2.8: Formas tempranas del compás magnético: La lámina de hierro en forma de pez flotante descrito en el Wu Ching Tsung Yao (Chhien Chi). Fuente: NEEDHAM, J.



Figura 2.9: Reconstrucción de Wang Chen-To.

Este pez, en un principio se definía como un pez construido con escamas de hierro que una vez imantadas hacían que el pez indicara el Sur.

El pez se hace con láminas de acero. Se convierte, como resultado de la magnetización, en una especie de imán artificial. Por el empuje ejercido por el agua, el pez flota como un pequeño barco [68].

En el escrito, el autor no especifica que la lámina de hierro había que frotarla con una piedra imán pero pudiera ser un olvido deliberado para mantener el secreto de su utilización como secreto militar. También se puede decir que este tipo de compases y los realizados con magnetita pudieron coexistir en una misma época y no delimitarlos cada uno en épocas diferentes.

Parece cierto, sin embargo, que si bien estas cosas estaban sucediendo, el uso de la magnetita en sí persistió en otras formas de brújula. Estas se describen en la enciclopedia *Shih Lin Kuang Chi* (Guía a través del Bosque de Asuntos), escrito por Chhen Yuan-Ching. Este libro no se puede fechar con exactitud; aunque fue impreso en 1325, se compiló en algún momento entre el 1100 y el 1250, probablemente después del traslado de la capital hacia el sur en 1135 [...] escribió:

Ellos (los magos) cortan un pedazo de madera en forma de un pez, tan grande como el pulgar, y le hacen un agujero en su vientre, en el que se ajusta perfectamente un pedazo de piedra imán, llenando la cavidad con cera. En esta cera se fija una aguja doblada como un gancho. Luego, cuando el pez se pone en el agua lo hará debido a su naturaleza, apuntando al sur, y si se mueve con el dedo volverá de nuevo a su posición original [94].

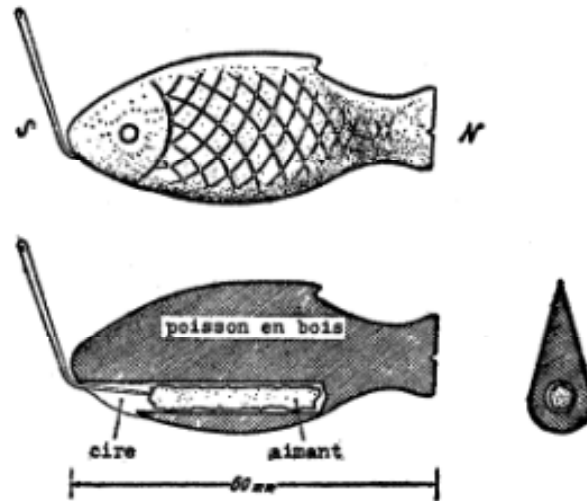


Figura 2.10: Formas tempranas del compás magnético: El pez flotante de madera que contiene magnetita y la aguja se describe en el *Shih Lin Kuang Chi*, (c. 1150). La piedra imán y la proyección del puntero de la aguja se fijan en su lugar con cera. Fuente: NEEDHAM, J.

Es importante determinar cada una de las fechas, por lo que también haremos una mención en lo que se refiere al pez hueco en el que se inserta un trozo de magnetita. Como se dice en la siguiente cita:

Hay que hacer una mención sobre la fecha de anotación acerca del pez hueco. Aunque el prefacio del *Wu Ching Tsung Yao* es de fecha de 1040, y el prefacio imperial de 1044 parece muy probable que la descripción de la brújula flotante no pueda ser posterior a 1027[...] pero en cualquier caso la existencia de la brújula flotante parece claramente establecida en las primeras décadas del siglo XI, y con toda probabilidad podríamos ir hasta la última parte del siglo X [94].

Además del pez flotante también se da cuenta de otros sistemas de compás rudimentario claramente descritos.

También cortan un trozo de madera en forma de una tortuga, y lo trabajan de la misma forma que antes, sólo que la aguja se fija en el extremo de la cola. Un pincho de bambú tan grueso como la punta de un palillo se fija en una pequeña tabla, y sostiene a la tortuga por la parte cóncava debajo de su cuerpo, donde hay un pequeño agujero. Luego, cuando se gira la tortuga, siempre apuntará hacia el norte lo que es debido a la aguja que se coloca en la cola.

Esto último es de gran interés, ya que indica que la suspensión seca inferior era conocida durante el período *Sung* [94].

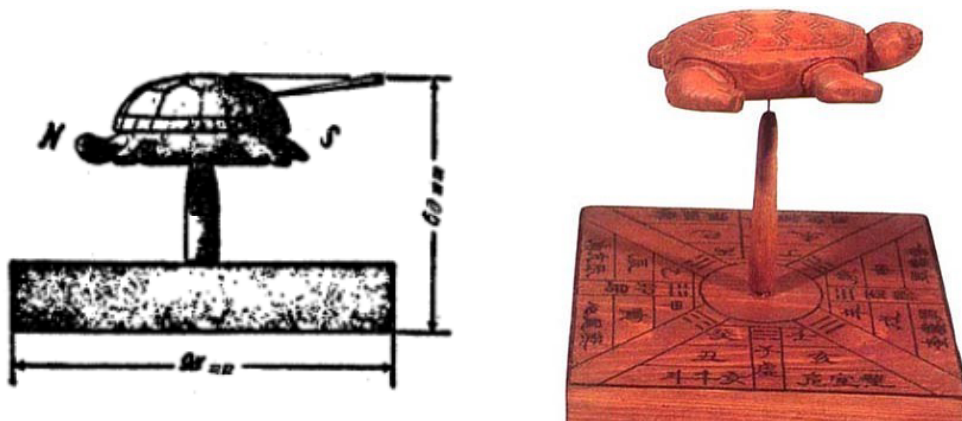


Figura 2.11: Formas tempranas del compás magnético: La tortuga de madera sobre pivote en seco que contiene magnetita y la aguja se describe en el *Shih Lin Kuang Chi*, (c. 1150). Fuente: NEEDHAM, J.

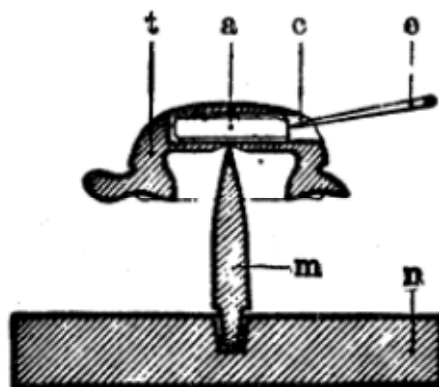


Figura 2.12: Formas tempranas del compás magnético: La tortuga de madera sobre pivote en seco que contiene magnetita y la aguja se describe en el *Shih Lin Kuang Chi*, (c. 1150), sección en alzado. Fuente: NEEDHAM, J.

La primera prueba irrefutable de la existencia de la aguja magnética que aparece escrita relato aproximadamente coetáneo al de Shen Kua, el *Mêng Chhi Pi Than*, que es atribuido a Chu Yu, denominado *Phing-Chou Kho Than* (Phingchow Table-Talk) entre los años 1111 y 1117, el cual se refiere a hechos ocurridos en otros puertos desde el año 1086 en adelante. Estos hechos eran conocidos por el autor gracias a los conocimientos que su padre le había transmitido, al haber sido oficial de alto rango en el Puerto de Cantón desde el año 1094 y gobernador desde 1099 hasta 1102.

En esta línea de acaecimientos, y para corroborar el uso más temprano de la aguja por los chinos tenemos un relato del año 1123 referenciado por Mêng Yuan-Lao. Es un pasaje citado en las memorias de Hsü Ching sobre una misión diplomática a Corea, en el que se relativiza todo en relación a las lunas etc. en lo que a medición del tiempo se refiere. En dicho relato se menciona la necesidad de utilizar la aguja que mira al sur en condiciones de invisibilidad del cielo y por ende de las estrellas para su situación en la mar. Esto ocurre todavía durante la época de la dinastía Song [68] [94].

Durante la noche, a menudo no es posible detenerse (debido al viento o la deriva de la corriente), por lo que el piloto tiene que gobernar por las estrellas y la Osa Mayor. Si la noche está nublada entonces él, usa la aguja flotante que indica el sur (*chih nan fou chen*) para determinar el sur y el norte [94].

Todavía siguiendo el rastro de los primeros escritos sobre la aguja magnética en su uso náutico, antes de la primera fecha europea de 1190, tenemos dos escritos más en los que se menciona dicha aguja. Después de la caída de la capital del imperio

norte de la época Sung, Khaifêng, en 1126, y en su posterior traslado a Hangchow, Mêng Yuan-Lao escribió el *Tung Ching Mêng Hua Lu* (Sueños de las Glorias de la Capital Oriental) donde el autor escribe respecto a la navegación:

En los días oscuros o lluviosos, y cuando las noches están cubiertas, los marineros se fían de la brújula (*chen Phan*). El piloto (*Huo Chhang*) se encarga de esto [94].

Es interesante ver que el título de piloto que controla la aguja magnética permanece invariable en los textos chinos hasta el siglo XVIII mientras el nombre de aguja magnética permanecerá invariable en su fabricación, hasta que los chinos plagiasen de los piratas japoneses la versión más moderna de la misma, retornada desde Europa, tras haber sufrido variaciones o mutaciones, a través de árabes y de jesuitas como mensajeros de los nuevos sistemas evolucionados en el marco geográfico europeo. Existen diferentes autores que determinan que aunque la piedra imán se había exportado de China a Japón, no hay evidencias de su utilización hasta la mitad del período Tokugawa entre los años 1603-1867 [68].

Hay muchísima bibliografía al respecto a la cronología de acontecimientos anteriores a las primeras referencias europeas pero que no vamos a pormenorizarlas debido a que ya hemos citado las más importantes cronológicamente.

A partir de ese momento existe un gran vacío en la continuidad de referencias hasta la aparecida en escritos europeos, con lo que queda en especulaciones cuál pudo haber sido el flujo lógico de la transferencia de conocimientos.

Se puede considerar sobre una transferencia por vías terrestres en diferentes rutas de comercio, debido a que la aguja magnética o brújula se utilizó con bastante anterioridad en las rutas terrestres, con lo que bien pudo ser la vía principal de transferencia de conocimientos.

Otros especulan que bien pudo ser a través de navegantes indios y árabes que utilizaban la zona del océano Índico en sus transacciones mercantiles, vía poco investigada o por el contrario, no fue la vía de comunicación principal. Esta vía sí parece que fue la de regreso de todas las modificaciones realizadas en la aguja náutica en ámbitos europeos y que se transfirieron a través de árabes a japoneses, etc. Finalmente llegó a los chinos con la influencia de la piratería y guerras con los japoneses, que había producido una mejora sustancial de su original aguja náutica, que evolucionó con otro punto de vista y otras necesidades.

Vamos a ir desgranando un poco lo acaecido a partir de este momento en Europa.

Tenemos claro que ya había habido contacto y conocimiento del magnetismo desde tiempos antiguos, como en tiempos de Tales, hecho que ya hemos mencionado con anterioridad. Luego se sumaron a éstos Plinio, Marcelo, etc.

La más cercana aproximación al descubrimiento de la polaridad magnética en Europa fue la observación de que en algunos casos la piedra imán repelía el hierro. Esto lo conoció Plinio, Marcelo (a comienzos del siglo V) y Joanes Filoponus (a comienzos del siglo VI), [...] El entendimiento adecuado tuvo que esperar hasta la llegada de la aguja magnética a Europa a finales del siglo XII [94].

Para los comienzos de la edad media ya se tenían claros algunos conocimientos básicos sobre el magnetismo:

Para el comienzo de la Edad Media se estableció que (a) la piedra imán atraía trozos de hierro, (b) esto lo hace a través de una distancia, (c) el hierro atraído se adhiere al imán, (d) el imán induce un poder de atracción al hierro atraído, el cual (e) lo retiene durante algún tiempo. También se había observado que (f) la influencia magnética podía actuar a través de substancias diferentes del hierro, y que (g) algunos imanes podían tanto repeler como atraer algunas piezas de hierro [94].

Siguiendo con los acontecimientos podemos definir que el primer indicio lo podemos encuadrar hacia finales del siglo XII.

El caso de uso más temprano del compás magnético para la navegación es algo parecido. Hacia el año 1190 se usaba en el Mediterráneo, pero también se menciona en textos chinos justo un siglo antes [94].

Aquí tendríamos que hacer una clara delimitación de fechas y lugares en los que se hace clara mención del compás o aguja magnética, como nos han realizado los historiadores más renombrados en la materia.

Comenzaremos por Guyot (o Guiot) de Provins (Francés, 1150-1208) escribió, hacia 1180, obras satíricas relativas a la moral, la más famosa de las cuales es *La Biblia Guiot* ("Biblia" que aquí no se refiere a la Santa Biblia, pero es un título medieval francés que significa "sátira") e incluye una referencia temprana a la aguja magnética [8] [104].

Alexander Neckam (Inglés, 1157-1217) [104]. Su nombre se asocia principalmente con la ciencia náutica. En su *De utensilibus* y *De naturis rerum* (ambas escritas en

1190), Neckam guardó para nosotros los primeros visos europeos sobre la aguja imantada como guía de los marinos, y la descripción europea más antigua de la brújula⁴.

Otro escritor relacionado con la aguja magnética sería Jacques de Vitry (1170-1241) en 1214 elegido Obispo de Acre. Llegó a Acre en 1216 y participó en el cerco de Damietta.



Figura 2.13: Jacobus de Vitriaco.

Fuente:<http://www.araldicavaticana.com/cardovitry.htm>

Estuvo envuelto intensamente en la quinta cruzada entre 1218 y 1220. En 1219 comenzó a escribir la *Historia Hierosolymitana* pero sólo logró acabar dos partes de dicho libro, *Historia orientalis* e *Historia occidentalis*. En la primera hace mención sobre la aguja magnética comentada por Klaproth [59] en el capítulo 89 sobre la *Historiae Hierosolymitanae* de Vitry, y también referida en otra obra por Sarton [104].

⁴ Se cree que fue probablemente en París donde Neckam oyó cómo un barco, entre otras de sus cosas, debe tener una aguja. El escrito *De utensilibus* asume una aguja montada en un pivote, que gira hasta apuntar al norte y por lo tanto orientar a los navegantes en tiempos sin visibilidad o en noches sin estrellas. Neckam no parece escribir esto como una novedad sorprendente: él simplemente registra lo que al parecer era una práctica habitual de muchos marineros del mundo católico. Fuera de todos los escritos de Neckam sobre la historia natural, el *De Naturis rerum*, es una especie de manual de los conocimientos científicos del siglo XII, y es de lejos el más importante: en el libro dos, capítulo XCVIII *De vi attractiva*, p. 183 de la edición de Tomas Wright, edición original de Longman, Green, Longman, Roberts, and Green, 1863. También aparece una mención similar en la sección de *Volume of vocabularies* del Tratado *De utensilibus* editado por Thomas Wright y publicado en 1881, p. 114.pp.119.

Petrus Peregrinus de Maharncuria (Peter the Wayfarer, o Pierre Pelerin de Maricourt) [99] estudioso francés del siglo XIII.

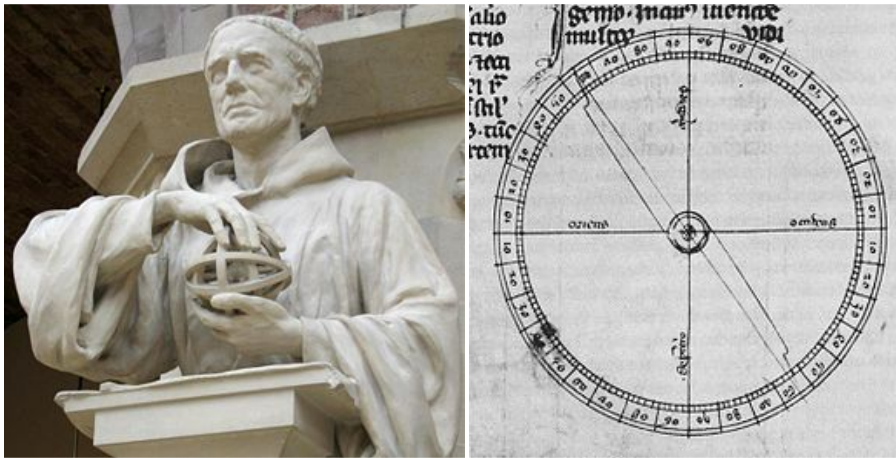


Figura 2.14: Pierre Pelerin de Maricourt. Aguja rotatoria de una brújula en una copia de la "Epístola de Magnete" (1269).

Fuente:http://www.ecured.cu/index.php/Petrus_Peregrinus

En 1269 escribe su famoso tratado que no es más que una carta *Epístola ad Sigerum de Foucaucourt militem de magnete* bien explicada a un desconocedor de la materia para que pudiera entender sus explicaciones. Esta carta la escribe durante el sitio de Lucerna en Italia y, debido al desconocimiento del receptor de la misma, ha quedado constancia clara de sus experimentos y observaciones.

Las teorías y prácticas de Peregrinus serán continuadas por Roger Bacon y con posterioridad, después de un largo período de olvido, por William Gilbert.

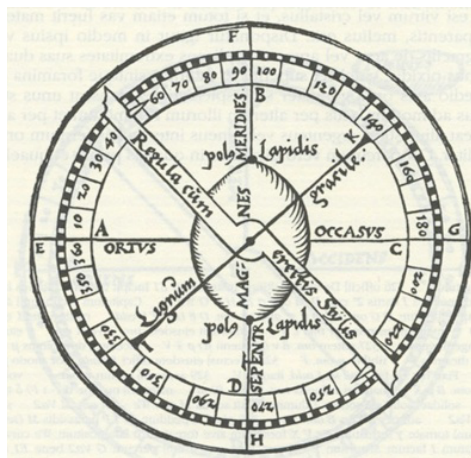


Figura 2.15: Brújula del libro traducido al inglés. "The letter of Peter Peregrinus on the magnet" [99].

En el *Journal of Arabic and Islamic Studies* se estudian detalladamente [116] dos textos inéditos que Petra Schmidl comenta con profusión de detalles, la relación de textos en los que se comenta la aguja magnética. La evidencia más temprana sobre una brújula la sitúa en la antología persa *Jamiç al-Hicayat* escrito por Sadid al-Din Muhammad ibn Muhammad Bukhari, conocido como al-çAwfi, donde se relata un suceso durante un viaje por el mar Rojo o por el Golfo Pérsico en el año 630 de la Hégira (1232-1233): un pez de hierro se frota con una piedra magnética y después puesto en un recipiente lleno de agua gira hasta que queda apuntando hacia el sur [94] [63]. Es una clara descripción de una brújula igual a la utilizada por los chinos, con lo que podemos definir la influencia de éstos sobre los navegantes árabes.

La primera descripción completa del uso de la brújula magnética para fines náuticos en el mundo islámico se ve en la obra *Kitab Kanz al-tujjar fi ma çrifat al-ahjar* escrito por Baylak al-Qibjaqi escrito en el 681 de la Hégira (1282). En dicha obra se describe el uso de una brújula flotante durante un viaje por mar, siendo el autor testigo de su utilización, desde Trípoli en Siria a Alejandría en el año 640 de la Hégira (1242-1243) [115] [63]. También se comenta que en el mar de la India es común el uso del pez que flota para orientarse en la mar.

Schmidl, en su estudio, data el primero de ellos cerca del año 1290 y fue escrito por el sultán yemení (Al-Ashraf çUmar ibn Yusuf) al- Ashraf, donde se menciona la brújula para determinar la *quibla*⁵.

El segundo texto es un tratado de un muecín llamado Ibn Simçun que contiene un capítulo del indicador magnético de la *quibla*. Este tratado está datado sobre el año 1300 de nuestra era. Solo se conoce una copia de dicho tratado. El trabajo se titula *Kanz al-yawakit fi çstiçab al-mawakit* fol. 190r que contiene el capítulo sobre el uso del instrumento para determinar la *quibla* para cada población.

En general no se han estudiado ni se han encontrado más referencias en esta época, para poder situarlos. Esto no quiere decir que no existan, pero que en el momento de la elaboración de la presente tesis no hay evidencias que lo corroboren.

⁵ Quibla, qibla, alquibla es la dirección En el idioma árabe (القبلة *al-qibla*) denomina genéricamente a una *dirección* especialmente la dirección de la orientación de los musulmanes que oran en dirección de La Meca.

Al igual que en la historia de la aguja magnética por parte del pueblo árabe, no consta ningún escrito ni literatura que haga referencia a citas indias, con lo que en principio no las situaremos en ese entorno histórico. Bien es cierto que los conocimientos de los chinos se difundieron a través de los indios hasta los árabes, aunque no haya evidencias literarias que lo corroboren aunque lo anteriormente citado podría dar fe de la difusión de la aguja china.

Quizás con el tiempo vayan emergiendo obras en las que se cite claramente la utilización del compás en estos períodos y se pueda completar con más seguridad la cronología del compás.

En esta misma época del 1300 hay que añadir lo que generalmente se acepta, aunque no dispongamos del suficiente rigor para contrastarlo, que alrededor de este año el compás marino fue inventado por un tal Flavio Gioja de Amalfi⁶. Pero al no haber nada escrito sobre esto, únicamente diremos que fue Flavio o algún otro italiano el responsable de la conjunción de la rosa de los vientos o alguna mejora de ésta conjuntamente con el imán para formar un compás muy cercano a lo que se utiliza hoy en día [94].

De aquí solo deducimos que el compás original había evolucionado desde una aguja imantada a una brújula como la que se usa en tierra. Pero esto no hace más que generar confusión a un timonel debido a que él necesita un rumbo que sea común con la proa del buque. Por lo tanto todavía le quedaría al compás y su comportamiento a bordo, bastante por evolucionar.

De hecho no se encuentra ninguna referencia al gobierno con compás hasta el siglo XV, así como tampoco una descripción del compás con el conjunto rosa-aguja hasta 1380. No hay evidencia de la utilización de un compás náutico verdadero anterior al año 1300, ni en el Este, ni en el Oeste [63].

Lo más parecido a un compás seco como el utilizado en Europa es una referencia a una aguja seca montada en un soporte (la tortuga, citada anteriormente) que data

⁶ Se cita a Gioja asociándolo al compás marino en WAGNER, L., *Manners, customs and observances: their origin and significance* (on line) London, William Heinemann, 1894, artículo 41. Disponible en: <http://www.sacred-texts.com/etc/mco/ml04.htm>. En realidad es un dato que en la actualidad es muy discutido como podemos ver en SEVEN OCEANS VIDEO & MULTIMEDIA PRODUCTION; KONKOLSKI, R., "Discovery From 9 to 13century (on line)", in *The Maritime Discovery*, [visto 3-1-2015]. Disponible en: <http://www.sevenoceans.com/MaritimeDiscovery/DiscoveryFrom9to13century.htm>. Incluso Wikipedia reputa la figura de Gioja como mítica y legendaria (Flavio Gioja, https://en.wikipedia.org/wiki/Flavio_Gioja).

entre el 1150 y el 1250 pero no existe aseveración alguna de que este sistema se utilizara en la navegación marítima, sino la típica aguja flotante en un cuenco, y así hasta el siglo XVI.

Con posterioridad, hacia mediados del siglo XVI se mejoró sustancialmente el compás con la aportación del italiano Girolamo Cardano (Italiano, 1501-1576) quien perfeccionó de manera muy práctica, un dispositivo a modo de aro con el que se conseguía mantener la horizontalidad de la aguja a pesar de las oscilaciones del balance y cabeceo del buque, conociéndose como “sistema cardan” al tomar el nombre del italiano⁷.



Figura 2.16: Girolamo Cardano. Fuente: <http://ecosanar.com/CRONO/>

También se cree que fue en este periodo cuando apareció la línea de fe grabada o pintada. Probablemente fuera una innovación portuguesa.

⁷ El sistema de suspensión denominado Cardan fue muy bien descrito por Girolamo Cardano pero ya aparece en un escrito de Filón de Bizancio, ingeniero griego que vivió en Egipto el siglo III a.C. y en China en el siglo II a.C. Consiste en dos aros concéntricos cuyos ejes forman ángulo recto, lo cual permite mantener la orientación de un eje de rotación en el espacio aunque su soporte se mueva. Esta forma de suspensión supuso un gran avance en la navegación ya que el cabeceo e inclinación de la nave debido al oleaje hacía que las brújulas convencionales no se pudieran utilizar durante los temporales. Gracias al sistema de suspensión cardan la brújula permanece horizontal, sea cual sea la posición de la nave. Sobre el invento chino “Inventos y hallazgos de una antigua civilización”. *El Correo*, año XLI, Unesco, 1988, p. 11. Sobre Filón de Bizancio y su cita sobre este tipo de suspensión VERNET GINÉS, J., “Un par de notas sobre la ciencia y la técnica de la España musulmana”, *Revista de Estudios Regionales*, nº extraordinario, vol. III, 1981, pp. 93-106, p. 101-102.

Esta línea de fe que se encontraba dentro del mortero estaba alineada con la línea central del buque, permitiendo al timonel alinear el centro del buque con el rumbo deseado en la rosa del compás.

Aunque no aparece ninguna otra mención de modificaciones posteriores hasta la época del gran desarrollo de la navegación oceánica, la aguja o compás magnético fue mejorando su apariencia y funcionamiento, certificando que el invento no fue causa de un solo descubrimiento sino que sufrió pequeñas modificaciones a lo largo del tiempo, modificaciones que derivaron en importantes mejoras tanto en su fabricación como en la utilización del mismo.

A finales del siglo XVI y a lo largo del XVII encontraremos nuevas mejoras y autores que merecen reseñarse.

Robert Norman fue un artesano, capaz de diseñar y fabricar una nueva generación de instrumentos astronómicos, que después de trabajar más de veinte años en la mar, aportó muchos conocimientos.

Sobre el año 1580 comenzó a fabricar compases además de otros instrumentos y cartas de navegación. Acostumbraba a asegurarse de que la aguja y la rosa estuvieran perfectamente equilibradas con la rosa en posición horizontal, antes de imantar la aguja. Pero comprobó que después de imantar la aguja el extremo septentrional de la rosa se inclinaba y permanecía inclinada. Debido a la insistencia de un amigo que utilizaba sus agujas para cálculos de declinación magnética le animo a publicar los resultados obtenidos por sus investigaciones y en el año 1581 lo publicó, *The Newe Attractive, Showing the Nature, Propertie, and Manifold Vertues* con dedicatoria a su amigo William Borough [95]. Norman en su libro no solo se ocupaba de la inclinación magnética sino también de la declinación.

Ya para entonces se conocía la existencia de la declinación así como una línea en la mitad del Atlántico que carecía de ella que hoy denominamos línea *agónica*.

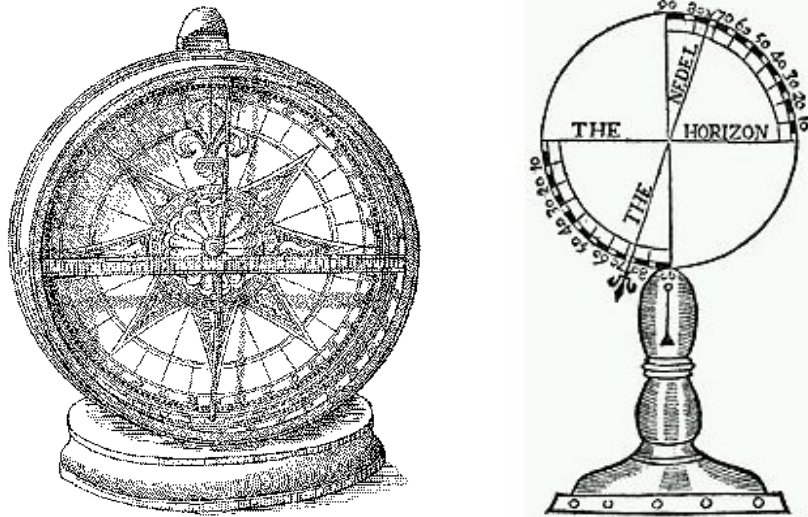


Figura 2.17: Dibujos del libro *The Newe Attractive, Showing the Nature, Propertie, and Manifold Vertues*.

Otro inglés que introdujo nuevas mejoras fue el archiconocido William Barlow (... 1625) que publicó en 1597 un libro en el que enumeraba las mejoras que había realizado en los instrumentos de navegación [9].

En 1616 escribió otro, casi a continuación del anterior sobre la magnetita y las agujas del compás [10]. En ambos libros escribió una aguda crítica sobre los malos compases por imprecisos y su mala construcción. Después de este estudio de las agujas defectuosas se propuso cambiar este problema y diseñó compases nuevos. Explicó las diferencias entre agujas de hierro y de acero, etc., así como el método para imantar las agujas con un trozo de magnetita. También diseñó un compás de azimut para comprobar la declinación, que era como un perfeccionamiento del diseñado por Norman. Este último instrumento fue utilizado para la navegación durante más de doscientos años.

Pese a los autores enumerados, los mayores avances en el periodo se deben a la figura de William Gilbert (inglés, 1544-1603) que retomó el tema del magnetismo cuando éste se había relegado al olvido.

Gilbert, después de situarse como médico de la reina Isabel I, en 1601 hasta su muerte, tuvo una posición privilegiada con el suficiente tiempo libre, que dedicó al estudio del magnetismo, redactando un profundo estudio del mismo y que en 1600 se tradujo en un compendio de seis libros que constituyen el "*De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure*" (Estudios sobre el imán y los cuerpos magnéticos así como referencias al gran imán Tierra). Todo el compendio

es conocido por “*De Magnete*” y está considerada como la primera gran obra de física experimental.



Figura 2.18: William Gilbert.

Fuente:<https://>

Lo escribió en latín que era el idioma universal de las ciencias.

La hipótesis central que Gilbert consideró, era el comportamiento de la Tierra como imán gigante que es, e invirtió mucho tiempo para probar esta hipótesis de un modo innovador, a partir de un experimento modelo. Para hacerlo se sirvió de una esfera de magnetita, conocida como *terella* o “pequeña tierra”, y de la aguja de una brújula de pequeño tamaño que podía girar libremente sobre un pedestal (o *versorium*).

La observación de Norman sobre la inclinación de la aguja, ya era conocida en el lugar donde fabricaba sus compases. Pero desconocía cuál podría ser el valor de la inclinación en otro lugar de la Tierra. Con el fin de dar respuesta a esta incógnita, Gilbert analizó la variación angular del *versorium* en diferentes posiciones alrededor de la *terella*. A partir de este modelo, propuso una ley para determinar la inclinación de la aguja magnética en todos los puntos del planeta, que aparece en el quinto libro de “*De Magnete*”. Su Tierra magnética puede considerarse el fundamento del Geomagnetismo, la rama de la Geofísica que estudia el campo magnético terrestre.

A partir de las *terellas* de Gilbert se empieza a generar un interés, a tiempos parciales, que en cada momento surge algún precursor que va añadiendo mejoras sobre una aguja seca que era de uso común en toda la zona europea.

En esta época era ya conocida la relación entre el campo magnético terrestre y la influencia del mismo en la fabricación de agujas magnéticas. En la Figura 2.19 del libro "De Magnete" se ve claramente a un artesano forjando una aguja magnética mirando hacia el norte, *septentrión*, con el fin de que la aguja adquiriera su magnetismo permanente en la dirección del norte magnético.

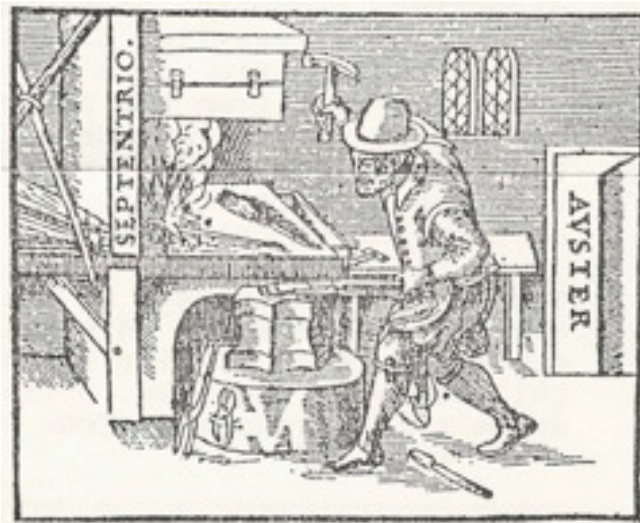


Figura 2.19: Arriba: Forjando una aguja magnética en la dirección del campo magnético terrestre; del libro "De Magnete" de William Gilbert, (1600).

Ya en el siglo XVIII, el doctor Knight (inglés, 1713-1772) inventó un sistema artificial, más efectivo que los imanes naturales, para imantar las agujas magnéticas que se utilizaban en las navegaciones, es decir para producir acero fuertemente magnetizado. Se negó siempre a destapar su sistema de imantación, evitando por tal motivo la posible pérdida de las ganancias que le reportaba el mismo, ya que se trataba de algo único en la construcción e imantación de las agujas de la época.

Después de su muerte su amigo y albacea, el doctor John Fothergill desveló los secretos del método de Knight⁸.

⁸ En general, Knight utilizaba fragmentos de imanes naturales de magnetita para imantar barras de acero por contacto. Después estas barras de acero se ataban juntas y de esta manera formaban un imán



Figura 2.20: Retrato de Gowin Knight realizado por Benjamín Wilson.

Fuente:http://www.sil.si.edu/digitalcollections/hst/scientific-identity/CF/display_results.cfm?alpha_sort=k

Knight, después de observar el sistema de fabricación de la mayoría de los compases que se utilizaban en esa época, decidió inventar un compás mucho más efectivo que los utilizados⁹.

Las observaciones en cuanto al efecto del hierro a bordo de los buques sobre la aguja magnética, no era algo nuevo en esos tiempos de finales del siglo XVIII. En el año 1538 un piloto distinguido de la flota portuguesa de la Indias, Joao de

mucho más potente que el fragmento original natural. Con este imán artificial producido se utilizaba para repetir el proceso anterior y crear un imán mucho más potente que el anterior. En última instancia con el imán más potente generado se producían imanes y agujas de compás.

Este aparato incluía dos cargadores con ruedas, que pesaban más de doscientos kilos cada uno. Cada cargador contenía doscientos cuarenta imanes de barras fuertemente amarrados. Al acercarse los dos cargadores entre sí cualquier barra de acero o aguja de compas que se colocara entre ellos se imantaba con mucha fuerza [50].

⁹ Mandó recoger algunos compases para empezar a investigar la problemática de los mismos. Detectó que la mayoría de las agujas magnéticas estaban realizadas de alambres doblados en forma de rombo. Los alambres solo se templaban en los extremos con el típico procedimiento de calentamiento al rojo y enfriado en agua. Este proceso provocaba un desvío magnético claro y medible de manera que ninguno de los compases investigados se ponían de acuerdo en señalar la dirección real del norte. Algunos buques tenían agujas realizadas con una pieza única de acero templado. En la observación de las agujas se veían que algunas de ellas incluso tenían seis polos diferentes.

El diseño más sencillo y efectivo sería una aguja rectangular larga sin agujero. Esta se situaría encima de la rosa, fabricada en papel muy fino, barnizado, sujetado en la circunferencia por una anilla de latón. La anilla serviría de contrapeso al peso de la aguja. El chapitel se colocaría debajo de la rosa para evitar agujerear la aguja [50].

Castro, ya había observado el comportamiento extraño de la aguja y estaba convencido que era por efecto de un cañón de hierro que se encontraba en las proximidades de la aguja. Esta es la primera referencia escrita del efecto del hierro en las proximidades de una aguja magnética [50].



Figura 2.21: Capitán Matthew Flinders, 1808.

Fuente:<http://www.datuopinion.com/matthew-flinders>

El oficial de la marina de guerra de nombre Mathew Flinders (Inglés, 1774-1814) daría algo de luz al magnetismo y los efectos del hierro y desvíos en los buques de madera en los albores del siglo XIX.

Después de muchas observaciones y estudios de la declinación, al igual que los levantamientos de las costas de Australia, a su vuelta y siendo ya prisionero de los franceses, dispuso de suficiente tiempo durante su reclusión en Île de France para meditar profundamente sobre el efecto del magnetismo.

A mediados del año 1812, Flinders redactó un informe en el que se leía como conclusión, que el desvío del compás dependía de la dirección de la proa del buque y era directamente proporcional a la inclinación magnética. De otra manera, quería decir que la latitud magnética afectaba también al desvío del compás. Para compensar este desvío sugirió que se colocara una barra de hierro viejo, hierro dulce, lo bastante larga para que llegara desde la cubierta hasta el centro del compás. Idea que gestó durante su cautiverio en la meseta de la isla Mauricio.

Aún hoy día, se coloca en las bitácoras, denominándose en su honor, barra Flinders.

Todo esto relacionado con una parte de la compensación se publicó en el *Naval Chronicle* en el año 1812 con el título de “*El magnetismo de los buques.*”

A Voyage to Terra Australis que fue el libro escrito después de su cautiverio en el que relata todos sus viajes a través del Índico y Australia, se publicó en 1814, justo un día antes de su muerte.

En el apéndice del libro, Flinders sugería la utilización de la barra vertical de hierro para compensar los errores del compás, pero desgraciadamente deberían pasar muchos años y muchos naufragios antes de que su sugerencia entrara en uso, con la nombrada barra Flinder [42].



Figura 2.22: William Scoresby Jnr.

Fuente: <http://www.whitbymuseum.org.uk/collections/scoresby1.htm>

Las investigaciones de William Scoresby (1789-1857) se aproximaron a la solución del problema de Flinders. Se percató de que la mayor parte de los elementos metálicos a bordo de un buque de madera se encontraban en posición vertical (clavos, tornillos, eje del cabrestante, las uñas de las anclas, los candeleros, partes del timón, etc.) y que todo esto se imantaba por la acción del campo magnético terrestre en un fenómeno “denominado magnetismo de inducción”. Otra deducción añadida a las observaciones de Flinders era que el aumento de la

declinación en latitudes septentrionales se debía a la combinación de dos fuerzas magnéticas: la vertical y la horizontal. Al aumentar la componente vertical, la horizontal disminuye y debido a esto se reduce también la capacidad del polo magnético de atraer a la aguja del compás.

Al igual que Flinders afirmó que la máxima desviación del compás se producía al navegar a rumbos Este u Oeste y menos al dirigirse a los rumbos Norte o Sur.

Scoresby, clasificó los elementos de hierro que eran susceptibles de imantarse con el magnetismo terrestre pero que perderían su magnetismo a medida que disminuyera el campo magnético, clasificándolos como *hierro dulce*. Todos los hierros verticales irían perdiendo su magnetismo a medida que un buque navegara hacia el ecuador, y los volverían a magnetizarse si continuaran hacia el hemisferio Sur pero con una polaridad invertida.



Figura 2.23: Thomas Young.

Fuente:http://todayinsci.com/Y/Young_Thomas/YoungThomas-Quotations.htm

Coetáneo de Scoresby fue Thomas Young, (1773-1829) que en 1820 escribió un artículo científico en la publicación *Brandé's Quarterly Journal* [129] sobre diversos aspectos de la declinación magnética.

Fue director del *Nautical Almanac* secretario de la "Comisión de la Longitud" y autor de diverso material relativo a la construcción naval. El objetivo de Young no

fue otro que el de predecir los errores de una aguja náutica en las regiones polares, con datos recabados de una expedición al Ártico.

Young había vislumbrado el concepto de dividir el material metálico de un buque de madera, para los efectos de la corrección del compás, entre hierro *dulce* que no tardaba en perder su magnetismo y el hierro *duro* que mantenía la carga magnética durante más tiempo.

Este artículo había sentado las bases de la teoría moderna del magnetismo náutico y las correcciones del compás pero, al igual que las sugerencias de Flinders, entraron en un pozo oscuro por tema burocrático del que no saldrían en bastante tiempo, permitiendo entretanto que se aplicaran inventos que no llegaron a solucionar el problema de los desvíos del compás náutico.

A partir de esta época de mediados del siglo XIX se va a ver mucho más comprometido el comportamiento de la aguja debido a los efectos del hierro y el acero utilizados en la construcción de los cascos de los buques.

El primer buque con casco metálico de hierro fue el *Aaron Manby* y con él se abrió la caja de los truenos en cuestión de corrección de la aguja magnética o náutica.

Al construirse el buque se habían golpeado y remachado todas las partes del casco, originándose el gran imán que constituía el propio buque, con una carga magnética *dura*, y era un magnetismo que se conservaba durante mucho tiempo. Es decir, el buque se comportaría como un imán permanente y gigante durante toda su existencia. Además el buque también contenía hierros de magnetismo *dulce* como eran candeleros, chimenea, timón, etc. Con esta generación de nuevos buques, comenzó un problema que aunque ya existía con anterioridad en los buques de madera se vería fuertemente incrementado en gran medida por la construcción completa de los buques de hierro.

El primer buque de hierro en el que se intentó realizar una compensación fue el *Garryowen* y la efectuó el capitán de fragata Edward Johnson por orden del Almirantazgo, con intención de dar con la solución a un problema que había agravado los desvíos que con anterioridad se producían en los buques de vela.

Una de las principales observaciones que realizó Johnson fue que mientras remolcaban el buque para abarloarlo a un muelle donde habían depositado unos

compases, las agujas de éstos, instalados frente a la proa y la popa del buque se desviaron en direcciones opuestas.

Esto significaba que el buque en sí, era un imán gigante con sus respectivos polos que desviaban las agujas en diferentes direcciones. De esta observación se dedujo que los buques en su fase de construcción se imantan en relación al magnetismo terrestre debido al golpeteo y montaje de las diferentes piezas que conforman el buque, actualmente sucede exactamente lo mismo desde que se comienzan a cortar las planchas y éstas se moldean y sueldan para formar las *previas*, que forman los *sub-bloques*, que unidos hacen *bloques* y que ensamblados crean las *torres*, para finalmente colocar éstas, en la grada o picadero. Determinó por lo tanto que había que tomar nota de la dirección en la que se construía el buque en relación al meridiano terrestre, con lo que se definió lo que hoy en día conocemos como *rumbo de grada* y que evidentemente influye en el desvío de la aguja magnética.

La única conclusión que Johnson pudo determinar era que se instalara la aguja por encima del efecto de la influencia del hierro del buque. Mencionó además otra posibilidad que con posterioridad se comprobaría que resultaba fundamental para la corrección de los compases que fue el que se pudiese determinar cuánto sería capaz de corregir un imán en una determinada posición, comentario que sería de una incalculable utilidad.

Johnson presentó su informe al respecto al Ministerio de Marina en el año 1836.

En 1838 Francis Beaufort solicitó a George Airy (1801-1892), astrónomo del Real Observatorio de Greenwich, que inspeccionara el *Rainbow*, el mayor vapor de casco de hierro construido hasta entonces. Beaufort fue fundador del *Admiralty Compass Committee* el año 1837.

Airy, en una dársena de Deptford, hizo elevar el buque con una grúa y le dio la vuelta en el aire, para comprobar las anomalías de los compases. Estudió los datos acumulados y se propuso realizar una experiencia con unas barras de hierro y unos imanes. Instaló un imán de barra de sesenta centímetros y una pieza adicional de hierro para corregir el compás principal e imanes de treinta y cinco centímetros en los otros compases que componían la experiencia. Se volvió a izar el buque con la grúa y se volvió a borrar el buque en el aire viendo que lo que se había realizado daba unos resultados más óptimos de lo que se había esperado.



Figura 2.24: George Biddell Airy, London Illustrated News, 4 January 1868.

En octubre del mismo año un armador inglés, Nathan Cairns solicitó a Airy que repitiera su experiencia con un buque nuevo que había mandado construir, el *Ironside*, que fue el primer velero construido con casco de hierro. En esta ocasión Airy corrigió el compás con tres imanes y sin barra de hierro en vez de con un imán y barra de hierro.

El buque efectuó la travesía hasta Brasil sin mayores percances, y comentaron que en general los compases habían funcionado correctamente.

Con esta noticia los armadores de buques de hierro se sintieron aliviados debido a que creían que no existía ninguna solución a los grandes desvíos de las agujas en buques de hierro.

Airy, con el paso del tiempo, perfeccionó su sistema y compensaba los errores con tres imanes, para el desvío semicircular, y dos cajas de eslabones de hierro, para el desvío cuadrantal. Pero todavía aparecerían mas tipos de desvíos de los que hasta ese momento se desconocía su existencia.

El *Admiralty Compass Committee* a partir de 1837 y tras varios años de estudios de distintos compases, producidos por diferentes fabricantes comprobaron que ninguno de ellos se acercaba a la calidad exigida por dicha comisión para un compás ideal. Por lo tanto la única solución sería que ellos mismos diseñaran, fabricaran y comprobaran dicho compás ideal.

En 1840 redactaron un informe en el que se especificaba como se debía fabricar, cuantas unidades y su uso preferencial para comparar con el resto de compases que se llevaran a bordo.

De todo esto nació el *Admiralty Standard Compass* y un método para corregir el desvío de dicho compás, escrito por la Armada Británica. Este compás fue el más longevo de todos, debido a que todavía se utilizaba en 1944.

El compás era de aguja seca con una rosa de dieciocho centímetros de diámetro, con coloración en blanco y negro con rumbos marcados y una gran flor de lis marcando el norte. El compás pivotaba en un mortero de cobre que estaba lacado en negro. El estilo tenía una punta de iridio que trabajaba con un chapitel de zafiro. Además como aguja para medir azimuts, contaba con una corona azimutal graduada en toda su circunferencia de 360 grados divididos cada medio grado. De toda su fabricación lo más importante y característico estaba bajo la rosa de los vientos y era que en vez de llevar una sola aguja llevaba cuatro agujas y un anillo de latón en toda la circunferencia.



Figura 2.25: Siméon-Denis Poisson, detail of a lithograph by François-Séraphin Delpech after a portrait by N. Maurin. Courtesy of the Archives de l'Académie des Sciences de Paris; photograph, J. Colomb-Gerard, Paris



Figura 2.26: Studio portrait photograph by Maull and Polyblank of Archibald Smith, MA, FRS (1813-1872), English mathematician who wrote on the deviation of the compass.

Para desarrollar el patrón de posicionamiento de las agujas se habían seguido los consejos del brillante matemático Archibald Smith (1813-1872). Éste sugirió que si se distribuían a ambos lados del estilo según una fórmula matemática, cuatro agujas terminarían con la tendencia de las agujas solitarias de oscilar con el balanceo de la embarcación, cosa que ocurría a los compases desde tiempos de Gowin Knight.

En años posteriores demostró matemáticamente, por casualidad, que la distribución de esta agujas múltiples también corregía los desvíos inherentes de los potentes compases de una sola aguja.

Archibald Smith defendió el compás del Almirantazgo y su uso con tablillas de desvío. Conjuntamente con su amigo el capitán Evans trabajaron durante muchos años juntos de donde surgió la creación del *Manual del Almirantazgo para determinar y calcular los desvíos del compas provocados por el hierro de un buque* (*Admiralty Manual for Ascertaining and Applying the Deviations of the Compass Caused by Iron in a Ship*), el cual se adoptó en los idiomas de los países de más interés como Estados Unidos, Francia, Rusia y España.

El éxito de Smith radicaba en un completo análisis matemático sobre el desvío de los compases causado por el magnetismo. Smith [117], se había basado en los

trabajos del francés Simeon-Denis Poisson (1781-1840) cuyo interés por este problema comenzó en 1818 [102]. La diferencia entre ambos estribaba en que los estudios de Poisson, se basaban en los componentes metálicos de un buque de madera sin contar con el magnetismo permanente del casco de hierro.

Smith tomó como inicio la base de Poisson ampliando y desarrollándola, al tener en consideración el factor del magnetismo permanente del casco de hierro. Además incluía dos tipos de desvío inherentes al método de los imanes y las cadenas de Airy que eran el error de escora, además de la inversión de polaridad magnética del hierro vertical dulce al navegar desde latitudes septentrionales a otras latitudes meridionales.

En 1856, William Scoresby viajó a Australia a bordo del *Royal Charter*, un velero nuevo con casco de hierro, y pudo comprobar con satisfacción que su teoría, que decía que el magnetismo del casco del buque cambiaría en el hemisferio sur, cumpliéndose al poco tiempo de cruzar el ecuador magnético.

Scoresby murió en el año 1857 sin ver publicado su libro sobre el viaje a Australia (*Journal of a Voyage to Australia and Round the World for Magnetical Research*) en el año 1859. Fue Archibald Smith el que se encargó de la edición del libro, en el cual escribió una introducción de cuarenta y dos páginas sobre el desvío del compás magnético.

Con posterioridad se siguieron realizando diferentes experimentos con las agujas y bitácoras cada una de ellas con diferentes resultados.

En 1854 el fabricante de compases, John Gray patentó una bitácora que decían que era la promesa de los mejores ajustes hasta entonces realizados. La diferencia con los anteriores es que la bitácora de Gray contenía imanes correctores que se podían situar en diferentes posiciones por medio de sistemas mecánicos permitiendo corregir los desvíos en el momento en que apareciesen. Esta bitácora también incluía un imán vertical que compensaba los desvíos causados por la escora del buque. Gray también instaló dos balas de cañón de treinta kilos cada una encima de dos pilares de latón a cada lado de la bitácora para sustituir las cajas con cadenas que posicionaba el sistema de Airy. De esta manera Gray se adelantaba en veinte años a otra bitácora de resultados similares, la bitácora de William Thomson.

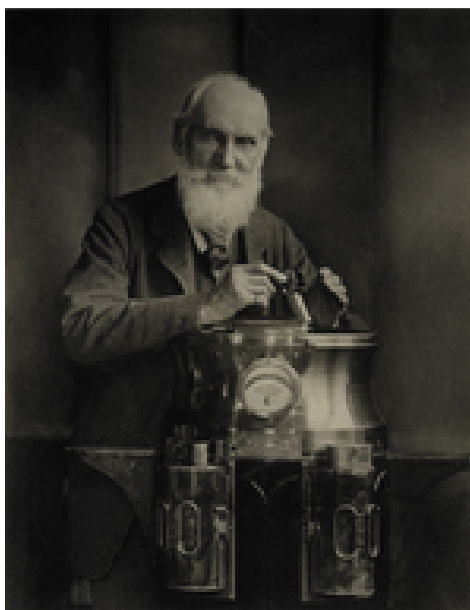


Figura 2.27: William Thomson y su bitácora.

Fuente:<http://global.britannica.com/biography/William-Thomson-Baron-Kelvin>

En 1874 William Thomson (1824-1907) presentó su primer prototipo de compás. Éste consistía en un par de agujas preparadas para un galvanómetro del doctor Joule. Cada aguja media poco más de un centímetro de longitud y las dos se sostenían en una estructura de varillas de cristal y aluminio con un peso total de un gramo y medio y todo ello colgado de una hebra de seda sin tejer, de poco más de un milímetro. El compás carecía de rosa de los vientos.

En 1876, Thomson, desarrolló y probó un nuevo compás a bordo del *Russia* de la compañía Cunard. No se parecía en nada al que había presentado dos años antes. Después de recabar información sobre el compás estándar, en el ministerio, respecto al número y longitud de las agujas, peso de la rosa etc. se entregó a fabricar un compás con todas las exigencias del ministerio. Sabía también que las rosas del compás estándar llevaba rosas intercambiables, una normal para condiciones normales y otra pesada para condiciones de mal tiempo, debido a que se creía, erróneamente, que las rosas pesadas eran más estables que las ligeras en condiciones de gran oleaje.

El diseño que estructuró Thomson llevaba todos los elementos que habían recomendado los diseñadores de compases anteriores: una rosa de gran diámetro para facilitar las lecturas; una rosa ligera que minimizara el desgaste del estilo; múltiples agujas a distancias calculadas, para corregir los errores del desvío y

mejorar la estabilidad de la rosa en condiciones de mala mar, y la distribución del peso hacia el exterior de la rosa, también para mejorar la estabilidad de la misma.

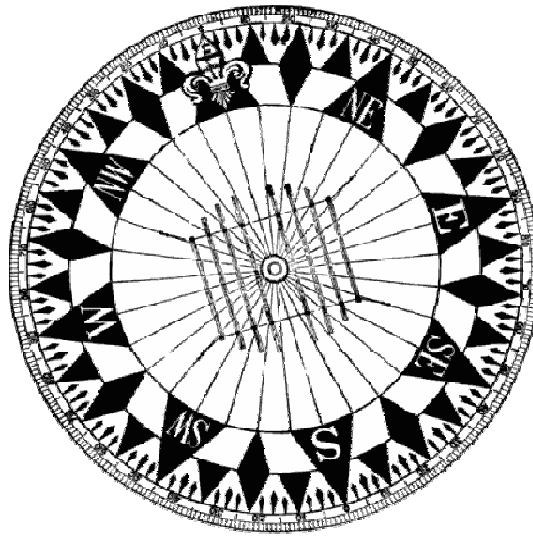


Figura 2.28: Rosa del compás de William Thomson, con un gran diámetro, ocho agujas, treinta y dos hebras de seda y la rosa recortada, 1876.

Su diseño tenía una rosa de veinticinco centímetros de diámetro, con los grados, los rumbos y la flor de lis en el norte. La rosa llevaba un borde exterior de aluminio, y con la parte central recortada. De un cubo central de aluminio se extendían hacia la rosa treinta y dos hebras de seda, radialmente como en una rueda. A ambos lados del cubo había ocho pequeñas agujas de cinco a ocho centímetros de longitud. La rosa pivotaba sobre un chapitel de zafiro colocado en el cubo y un estilo con punta de iridio. El peso total de la rosa que descansaba sobre la punta de iridio era de ciento ochenta granos troy¹⁰. Bastante más ligera que las coetáneas que se utilizaban de mil quinientos granos troy, (una rosa de diecinueve centímetros del compás del ministerio) y también más ligera que la de mil novecientos gramos de la rosa de veinticinco centímetros que utilizaban los buques mercantes.

Todo esto iba colocado en una bitácora barnizada en cuyo interior se ocultaban los imanes para el ajuste de las correcciones tanto hacia babor o estribor y hacia proa o popa. Se le había añadido un imán vertical ajustable para corregir el desvío de escora pues, según los cálculos de Archibald cada grado de escora generaba dos grados de desvío.

¹⁰ "Granos troy": medida que se utilizaba para pesar metales preciosos etc. El peso de las rosas se indicaba en estas medidas. Un grano troy equivale a 0,06479891 gramos del sistema métrico.

En el exterior, sobre dos ménsulas, se ajustaban unas bolas de hierro dulce. En posteriores modificaciones de su bitácora, Thomson también incorporó a su bitácora la barra Flinder además de realizar diversos ajustes que mejoraban el funcionamiento de su compás.

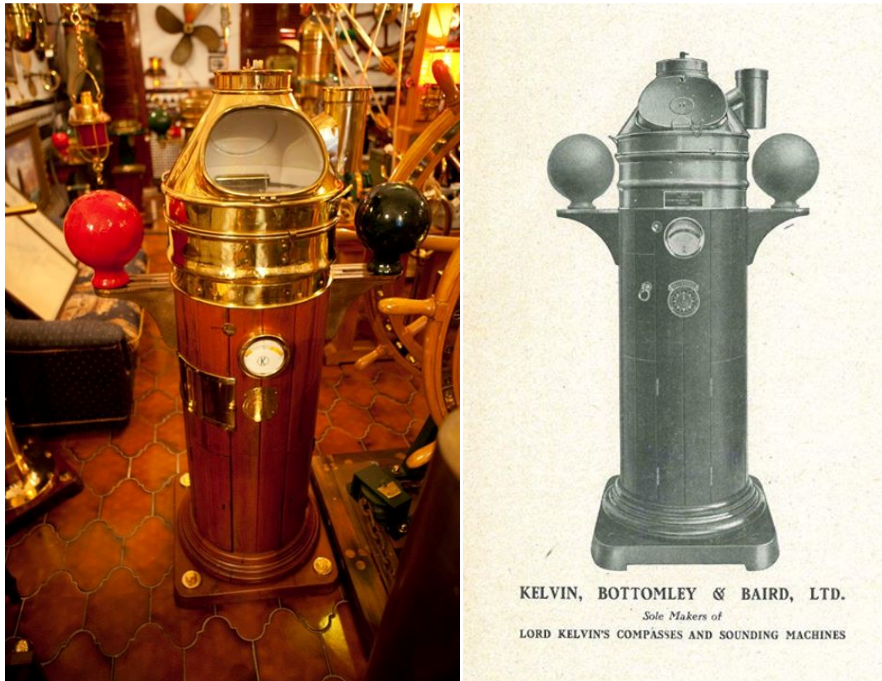


Figura 2.29: Bitácora de William Thomson (Lord Kelvin) de 1876 (Museo Marítimo de Málaga).

En 1906 los compases de Thomson fueron reemplazados por otros de líquido. Debido al retraso que conllevó la adopción de los compases de Thomson por la Armada inglesa, ésta se había retrasado en su puesta al día debido a que en el ámbito internacional ya se habían dado pasos decisivos hacia las agujas líquidas que eran mejores y más seguras que las secas como la de Thomson. Aunque fue en el año 1876 cuando Thomson patentó los primeros modelos de compás y bitácora, apareció también en esa primera década de 1870 el compás flotante de Ritchie, después de sufrir muchas modificaciones desde la fabricación de ese primer compás líquido, instrumento que fue elegido por la Armada estadounidense como su compás estándar. Se cree que con esta elección, la Armada estadounidense se adelantó en unos cuarenta años a la Armada británica. Otra razón añadida a las anteriores fue que en los comienzos del siglo XX las embarcaciones habían adquirido unas velocidades muy altas que generaban problemas a las agujas secas, como pudo demostrarse en unas pruebas realizadas en 1881, mientras que las líquidas no estaban afectadas por ese factor velocidad, razón que llegó a defenestrar totalmente a las agujas secas en favor de las líquidas.



Figura 2.30: Edward John Dent, 1890

<http://www.dentlondon.com/about/history.php>

En 1890 el Ministerio de Marina inglés encargó a cuatro fabricantes que diseñaran un compás líquido que se pudiera utilizar en vapores pequeños y en los botes de remo y vela. Seleccionaron una aguja de E.J. Dent (1790-1853) que llevaba más de cincuenta años fabricando compases líquidos para la Armada. Esto trajo consigo la protesta de Thomson a lo que el Ministerio hizo caso omiso debido a que las agujas secas no se habían considerado una buena opción para embarcaciones pequeñas.

Un año más tarde se hicieron unas pruebas entre la aguja líquida y una aguja seca que presentó William Thomson en la que los resultados fueron claramente favorables a la aguja líquida debido a que la seca no dejaba de vibrar mientras que la líquida mantenía una estabilidad impresionante.

No debemos olvidar que en Gran Bretaña ya se habían realizado intentos por crear un compás líquido propio. Ya en 1813 el que fuera relojero y orfebre Francis Crow, registró su patente número 3644, con bastantes mejoras en el compás náutico. En ella incluía muchas características de los compases líquidos actuales: un mortero esmaltado en negro con una tapa de vidrio conteniendo alcohol en vez de agua, con una cámara de expansión para absorber o equilibrar el líquido cuando se contrajera o expandiera.

El elemento más importante del compás era la rosa que consistía en un flotador circular hueco de cobre, con los rumbos pintados en su parte superior. La aguja se

encontraba en el interior del flotador. Pegado a la parte inferior del cristal, en la parte superior de la aguja, se encontraba el estilo alineado con el cono del flotador con un peso total de unos veinticuatro granos troy, mientras que el peso que se ejerce en el punto de suspensión de un compás tradicional no baja de los setecientos granos. El líquido amortiguaba el vaivén de los compases secos y de esta manera reducía el desgaste del estilo.

El almirantazgo no hizo caso de las ventajas del compás líquido de Crow ni de ningún compás líquido.

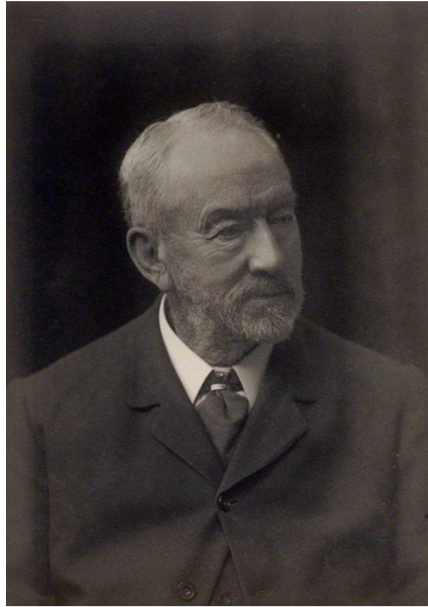
El modelo de Crow había solucionado dos de los problemas de los compases líquidos. Uno era el remolino de líquido que se provocaba por un cambio súbito de rumbo en la embarcación. El mortero del compás también giraba a gran velocidad y la fricción que se generaba entre el mortero y el líquido provocaba una serie de remolinos que distorsionaban la rosa y la aguja.

El segundo problema era parecido. Cuando el buque balanceaba, el líquido de la parte inferior pasaba a la parte superior de la rosa y dificultaba los movimientos de ésta.

Todo esto ya fue ajustado por Crow en 1813, reduciendo el tamaño de la rosa, pero ningún fabricante tuvo este diseño en cuenta hasta la primera década del siglo XX, siendo una característica habitual en los compases líquidos de calidad.

En esta situación Creak (1835-1920) y Chetwynd (1866-1914) desarrollaron una nueva aguja líquida que sustituiría a la de Thomson.

El capitán de fragata L.W.P. Chetwynd (Louis Wentworth Pakington) en 1904 encargó un mortero y una rosa para sus experimentos y comprobó que se habían equivocado en el tamaño de la rosa. Malhumorado por el error hizo girar al mortero y vio que la rosa se mantenía estable. Se había dado cuenta de la importancia de este descubrimiento y un año más tarde se realizaban unas pruebas de mar con el compás de Chetwynd.



*Figura 2.31: Ettrick William Creak, 1917. Fuente: De Walter Stoneman
Bromide print. National Portrait Gallery, London*

Conjuntamente con él, había trabajado Ettrick Creak, que añadiendo a los elementos innovadores incluidos por Creak, como la rosa reducida, fueron los determinantes para el diseño de su nuevo compás. Creak, comentaba que el compás, se tenía que componer de agujas múltiples, el punto de suspensión tenía que estar en el mismo plano horizontal que la rosa y que los pivotes del cardan, el centro de flotación de la aguja por debajo del punto de suspensión, y el centro de gravedad de la rosa y sus agujas por debajo del centro de flotación.

Estas son las grandes aportaciones al diseño actual del compás magnético siendo muy pocas y significativas las aportaciones que se han hecho a su diseño desde los inicios del siglo XX. Añadiremos por último que en la actualidad, se utilizan los compases con forma de bóveda. La ventaja de estos últimos es que reduce el error de los remolinos y su forma de cúpula funciona como una lupa para leer los rumbos. Además se elimina el cardan exterior, si el buque se escora la rosa se mantiene siempre en el plano horizontal y además puede girar dentro de la bóveda sin temor a que se enganche algo que era imposible de pensar de una rosa de un compás plano sin sistema de cardan.

Como podemos ver, si recordamos desde el inicio de la aguja náutica ha realizado un recorrido vertiginoso desde su aparición como una aguja imantada flotando en un recipiente de agua hasta volver a ser un conjunto de agujas imantadas pivotando en un recipiente de alcohol. Han pasado muchos siglos y el compás ha

vuelto a sus orígenes, salvando los perfeccionamientos acaecidos en tan largo recorrido.

2.2.- Aparición y desarrollo del compás giroscópico

Durante casi mil años la aguja imantada ha servido de guía a los navegantes, hasta que en la actualidad se ha sustituido por una aguja giroscópica o un compás *fluxgate* o en un momento más reciente por los GPSs o compases satelitales.

Aun así debemos recordar el consejo dado en el año 1889 por el capitán de navío E.W.Creak:

En última instancia, la ciencia verdadera nos enseña algo que no debemos olvidar jamás. Comprueben el desvío siempre que puedan, anótenlo en un cuaderno y presten atención a sus cambios en cualquier circunstancia...De este modo, recibirán la recompensa alguna noche oscura e incómoda, cuando sientan la confianza de poder trazar el rumbo preciso sin demora y sin detrimento de la misión encomendada al buque.

Hoy en día este buen consejo se ha perdido en las tinieblas de los mares y estamos viendo el resultado de una navegación basada solo en medios electrónicos que suelen fallar, por causas diversas, más a menudo de lo que esperamos.



Figura 2.32: Fotografía de Johann Gottlieb Friedrich Bohnenberger. Fuente: Universidad de Tübingen.

Después de casi mil años de conocimiento de la aguja náutica y de la orientación por medio del mismo, a principios del siglo XX aparece la figura de la máquina

que va a desterrar a la milenaria aguja magnética. Aparece el girocompás. Un aparato cuyo invento se acredita a J.G.F. Bohnenberger (1765-1831) en 1817. Este creador no le denominó giróscopo, sino simplemente “máquina” [131].

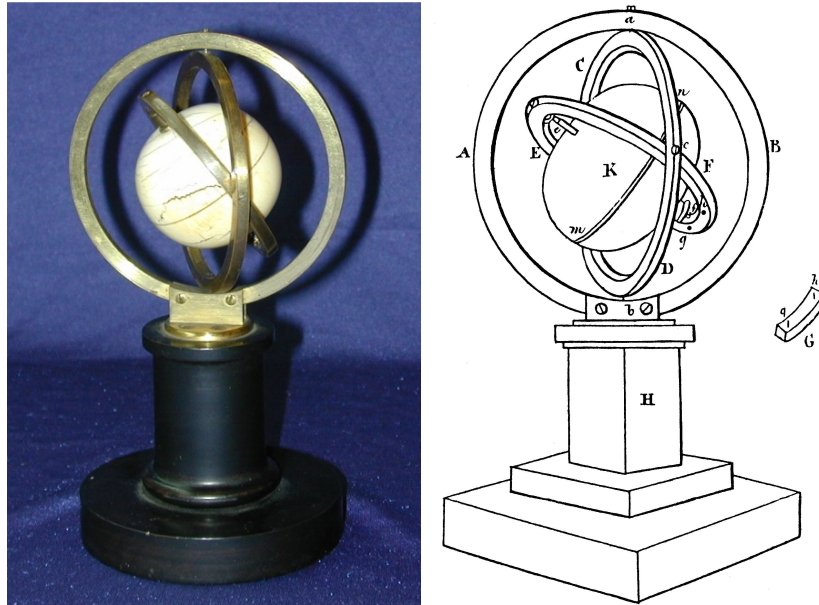


Figura 2.33: Ejemplar de la máquina de Bohnenberger recientemente descubierto (hacia 1813) y Dibujo de la publicación original de Bohnenberger de 1817(City Museum (Stadtmuseum) of Tübingen)

En 1852 el físico Jean Bernard León Foucault (1819-1868) explicó los principios inerciales del giróscopo. Foucault le dio nombre de giróscopo a su volante giratorio tomado de las palabras griegas de “gyros” (revolución) y de “skopein”.

En 1878 G. M. Hopkins, que reunió las novedades y descubrimientos sobre el giróscopo de Foucault y la aplicación de de la electricidad a dicho giróscopo construyó el primer giróscopo cuyo rotor estaba movido por un motor eléctrico, compensando de esta manera el amortiguamiento del movimiento de dicho rotor



Figura 2.34: (Izq.) Fotografía del aparato de demostración del giróscopo de Foucault, 1883 (Science & Society Picture Library). (Ctro.) Fotografía de Jean Bernard Léon Foucault. (Dcha.) Giróscopo inventado por Léon Foucault, y construido por Dumoulin-Froment, 1852. Fotografía tomada en el National Conservatory of Arts and Crafts museum, Paris.

Con todos estos logros previos, Martinus Gerardus Van De Bos (1785-1847) logró aplicar estos descubrimientos a la navegación marítima inventando de esta manera el girocompás. En 1885 patentó el primer girocompás que, sin embargo, nunca llegó a funcionar correctamente.

En 1889 Arthur Constantin Krebs (1850-1935) diseñó un giróscopo pendular eléctrico, adaptando un motor eléctrico al giróscopo marino de Dumoulin-Froment, para la Armada Francesa que se probó en el submarino experimental *Gymnote*. Le dio a dicho submarino la capacidad de mantener una línea recta, bajo el agua, durante varias horas.

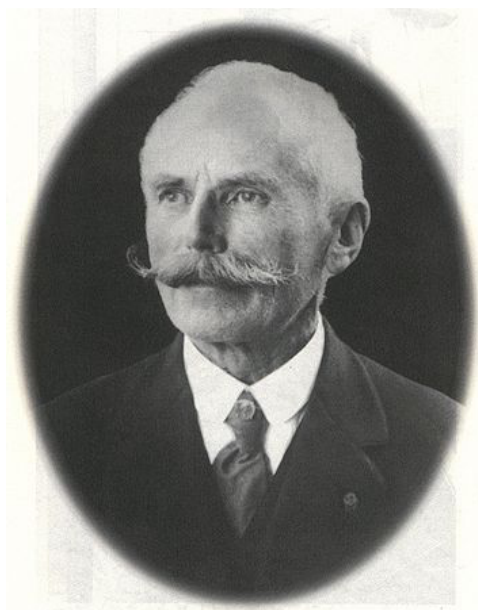


Figura 2.35: Fotografía de Arthur Constantin Krebs. Fuente: Director General de la compañía Panhard & Levassor en 1910

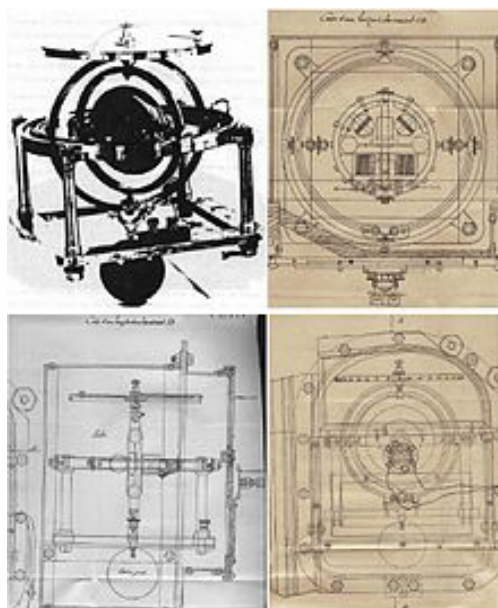


Figura 2.36: Diseño del giróscopo de Dumoulin-Krebs de 1889. Fuente: Archivos de la familia Krebs. Autor Philippe Krebs.

En 1903 Herman Anschütz-Kaempfe (1872-1931) construyó el primer girocompás que funcionaba correctamente. En 1905 fundó una firma cerca de Kiel para la fabricación de dispositivos de navegación utilizando los giróscopos de su invención. En 1908 Herman Anschütz-Kaempfe y el inventor Elmer Ambrose Sperry (1860-1930) patentaron el girocompás, el primero en Gran Bretaña y el segundo en los Estados Unidos. Cuando Sperry intentó vender su aparato a la

Armada Alemana, Anschütz le denunció por violación de patente. Finalmente la justicia le dio la razón a Anschütz en 1915.

Desarrolló en 1927 su "bola giróscopo Anschütz-Zweikreisel". Este instrumento de navegación es el prototipo de las agujas giroscópicas actuales. Los tres discos giroscópicos son el resultado de la colaboración con su primo Maximilian Joseph Johannes Eduard Schuler que se unió a la firma de Anschütz en 1906, era un ingeniero alemán que es más conocido por descubrir el principio conocido como la sintonización Schuler que es fundamental para el funcionamiento de un girocompás o sistema de guía inercial que opera cerca de la superficie terrestre.



Figura 2.37: Fotografía del corte de la esfera de un girocompás Anschütz y girocompás original completo.



Figura 2.38: Fotografía de un girocompás Anschütz actual.

Toda esta nueva tecnología generó un número indefinido de aparatos que generaron seguridad en la navegación. A diferencia de los compases magnéticos los girocompases indicaban el Norte verdadero en lugar del magnético y además no les afectaban los metales de la estructura de buque. También tenían desventajas pues, además de ser muy caros dependían íntegramente de la electricidad, y necesitaban de un tiempo importante para estabilizar su funcionamiento.

En 1947, el HMS *Vanguard* que realizaba el viaje de Inglaterra a Ciudad del Cabo padeció una pérdida total de electricidad. Sin electricidad la nueva tecnología se había parado. A esto hubo que añadir que el *Vanguard* no tenía ningún compás magnético, ya que el Almirantazgo tomó la decisión de eliminarlos el año 1946, justo un año antes del acontecimiento de la pérdida de electricidad.

El *Vanguard* era considerado el acorazado más moderno de la flota británica además del orgullo de la Armada y en esta ocasión sufrió la vergüenza de tener que navegar con las estrellas. A toda esta vergüenza hubo que sumarle la aún mayor de llevar a bordo al rey Jorge VI.

En la actualidad todas las fuerzas navales y las marinas mercantes mundiales llevan a bordo compases magnéticos para evitar casos similares.

Antes de continuar en la línea de los giróscopos y sistemas de posicionamiento hacemos un breve inciso por su interés. A continuación se demuestra la afección del magnetismo en las construcciones de buques de acero y los sistemas utilizados en relación a ese magnetismo inducido durante la construcción de dichas unidades navales.

Durante la 1ª Guerra Mundial, se desarrollaron técnicas de destrucción de buques enemigos utilizando la ya conocida influencia de la estructura metálica de los buques para ser detectados y destruidos.¹

El Reino Unido era, y en gran medida sigue siendo, dependiente de los suministros de alimentos del exterior para alimentar a la población. La alta tasa de

¹ Durante la construcción de un buque de acero, éste adquiere un campo magnético permanente. El campo magnético adquirido se añade o se resta del campo magnético terrestre. Las minas magnéticas se construían con sensores magnéticos para activar dichas minas cuando detectaran la distorsión en el campo magnético terrestre causado por un buque que pasa por encima de ella. Originariamente las minas magnéticas se construyeron durante la 2ª Guerra Mundial, pero la investigación sobre ellas se suspendió en general excepto en Alemania. Las minas se colocaban por medio de buques o aviones.

pérdida de barcos debido a las minas al comienzo de la 2ª Guerra Mundial amenazaba la supervivencia del país. Se hicieron esfuerzos para eliminar con dragaminas pero esto no fue suficiente para controlar el problema. Se tenía que buscar una solución al problema mediante la reducción del magnetismo de los buques de modo que no pudieran ser detectados por las minas magnéticas.

El trabajo de Charles Frederick Goodeve (1904-1980) fue pionero en el desarrollo del sistema para engañar a las minas magnéticas. El objetivo de la desmagnetización era, en la medida de lo posible, anular el campo magnético del buque, o al menos reducirlo a una cuantía que no pudiera ser detectado por las minas magnéticas.



Figura 2.39: Fotografía de Charles F. Goodeve. Fuente: De la Universidad de Manitoba, ex-alumno y ex funcionario de la División de Winnipeg.

El término des-magnetización (*degaussing* o *deperming*) [55] y el proceso se le denominó de esta manera en honor a Carl Friedrich Gauss, un genio y pionero de las matemáticas y el magnetismo alemán, que murió en 1855 así como a la unidad CGS de inducción magnética.

Se puede decir que más o menos en la misma época, en Rusia, también se investigó sobre el mismo tema por la misma razón que en Gran Bretaña. La investigación la llevo a cabo Igor Vasílievich Kurchátov (1903-1960).



Figura 2.40: Fotografía de Igor Vasílievich Kurchátov

Se incorporó a las secciones científicas de la Industria de Guerra a partir del año 1941, como responsable junto con un equipo de entusiastas científicos, y aplicaron sus experimentos a inventos concretos. Pusieron en ejecución la desmagnetización de los buques de combate (para impedir la activación de las minas magnética marinas desarrolladas por los alemanes), colocando los dispositivos en Agosto de 1941 a toda la Flota de Guerra del Mar Negro. Con el sistema de desmagnetización el LFTI, salvó y protegió a cientos de buques soviéticos de las minas nazis magnéticas.

El girocompás, también está siendo relegado a segundo término, desde que el sistema GPS se ha implantado en todos los apartados técnicos de situación y posicionamiento así como en el direccionamiento de naves y artilugios militares.

Con anterioridad al GPS se desarrollaron, por necesidades de los conflictos militares diferentes sistemas que pudieran posicionar buques, aviones, etc. en un lugar aunque fuera de noche o no se pudiera situar por visual directa. De esta necesidad surgieron sistemas basados en ondas radioeléctricas, el sistema LORAN el sistema OMEGA y el sistema DECCA. El sistema LORAN comenzó a desarrollarse el 1940, y se convirtió en el primer sistema de posicionamiento que podía funcionar en cualquier condición meteorológica. Este sistema era un sistema hiperbólico que permitía fijar la posición de un buque con un error menor de 160 metros. El considerado inventor primero del sistema fue Roger Lee Easton (1921-

2014) científico americano que invento y diseñó el sistema de posicionamiento global, más comúnmente conocido como GPS.



Figura 2.41: Fotografía de Roger L. Easton en el Salón de la Fama de los Inventores Nacionales. Fuente Salón de la Fama de los Inventores Nacionales 2010.

En 1955 preparó el proyecto *Vanguard* para un proyecto satelital en competencia con Wernher Von Braun. La administración americana seleccionó su proyecto en 1957 En 1959 diseñó el sistema de vigilancia espacial NAVSPASUR. Este sistema fue el primer sistema en detectar y seguir todo tipo de objetos orbitales terrestres.²

Más tarde en su carrera en el NLR concibió patentó y comenzó el desarrollo y la tecnología esencial para el sistema de posicionamiento global americano.

Este fue el comienzo del sistema, por supuesto de utilización meramente militar. Esta tecnología no se desarrollaría para uso civil hasta pasadas unas décadas.

En los años 70 el físico ingeniero Ivan Getting y el profesor Bradford Parkinson, los dos con gran experiencia en el campo militar idearon una red de satélites que permitía el seguimiento de un objeto en movimiento mediante una conexión entre una red de estaciones y antenas en tierra con los satélites militares americanos. De esta manera pero con bastante retraso en el tiempo, hasta el año 1994 no hubo posibilidad de su utilización para medios civiles, y es a partir de ese año cuando

² <http://www.afspc.af.mil/shared/media/document/AFD-100405-045.pdf>

empieza a expandirse el sistema por todo el mundo y por todos los medios que hoy conocemos.

CAPITULO 3

AGUJA Y DECLINACIÓN MAGNÉTICA, DESVÍO Y COMPENSACIÓN

3.1.- Aguja Magnética, Declinación Magnética (δm) y Desvío (Δ)

Primeramente tenemos que decir que la aguja magnética nos sirve en general a todos para orientarnos en un entorno en que no tenemos referencias para determinar una dirección. Debido a esta dificultad, a través del tiempo, el hombre ha ido ideando diferentes ayudas mediante las cuales poder orientarse correctamente tanto en la oscuridad, como en situaciones de escasa o nula visibilidad. Para ello el hombre ha desarrollado y perfeccionado un instrumento que le diera confianza en sus desplazamientos y en el cual creer a ciegas. De todo esto surgió el compás, aguja magnética o brújula, como se quiera denominar. Esto no fue suficiente ya que dependiendo del lugar en el que se ubicara la aguja, ésta indicaba distintas direcciones diferentes de la real o geográfica. Surge el primer escollo a salvar: la declinación magnética. Aún siendo conocida desde tiempos ancestrales, no se conocía su fundamento y menos aún su variabilidad en tiempo y espacio.

Fruto del geomagnetismo terrestre y desconocida hasta avanzada la historia, la existencia de distintas teorías del origen de la declinación magnética, que explican una variación entre el norte verdadero y el norte magnético, fluctuación sin una regularidad controlada e independiente en tiempo y lugar. Gracias a esas teorías, y avances en el conocimiento del geomagnetismo terrestre, se calcula la declinación magnética y su variación en el tiempo con gran precisión. A día de hoy la NOAA posibilita la utilización de sus programas de cálculo para determinar la declinación magnética en cualquier punto del globo terráqueo definiendo una posición en latitud y longitud para obtención de dicho dato.

La declinación magnética (δm) nos permite conocer a partir del norte magnético el norte verdadero. Con esta premisa y conociendo este ajuste sería suficiente para que no tuviéramos problemas para definir la dirección correcta hacia un punto determinado.

Aquí es donde aparece la segunda parte del problema que ha traído de cabeza a muchísima gente de mar durante muchos siglos. Siendo sabedores de la existencia

de la declinación magnética ¿Por qué la aguja magnética no nos indica correctamente la dirección verdadera? El tema principal que se trata en el presente trabajo es simplemente la compensación del desvío de la aguja magnética.

La aguja, ubicada en la actualidad en un entorno metálico, origina una afección importante sobre la aguja de marear o magnética. Entorno que se divide en diferentes secciones que se orientan en diferentes direcciones en el ensamblaje de los diferentes bloques en la estructura del buque. Hay unidades metálicas que, constructivamente se ubican en una posición longitudinal, otras en un sentido transversal y unas terceras en sentido vertical, generando diferentes efectos perturbadores sobre la aguja magnética, que finalmente originan el error objeto de nuestro estudio que denominamos desvío (Δ).

En realidad lo que realizamos en la compensación de una aguja magnética es sustituir los componentes longitudinales, transversales y verticales de la construcción del buque por unos hierros ficticios que obran en esas determinadas direcciones y de esta manera tratamos de compensar, con distintos elementos magnéticos, con la idea principal de anularlos completamente, que al resultar imposible nos conformamos compensando lo máximo posible por debajo de unos valores límites preestablecidos, plasmando los valores residuales obtenidos tras la misma en una tablilla de desvíos.

Debido a la fabricación en acero en los buques de la industria naval actual, y en siglos anteriores por las partes metálicas de cañones, clavos etc. se produce un error que es proporcional a la cuantía de materiales férricos que componen la unidad del buque. En un principio, en la época de los veleros con casco de madera, Poisson y posteriormente Archibald Smith, derivando de este primero, en épocas de los buques de hierro y acero, dieron con los cálculos matemáticos que nos permiten sustituir todos los hierros del buque por unos coeficientes y calcular los errores o desvíos que produce sobre la aguja magnética, el cúmulo de materiales ferrosos de un buque. A partir de ese momento solo restaba conseguir la manera de compensar esos errores de una manera efectiva. Esto sucedió después de muchos pequeños avances que Thomson supo aunar concentrando en su famosa bitácora, la misma que actualmente permanece funcional en muchos buques de nuestros días. También es cierto que se han modificado los materiales constructivos de las bitácoras desde la época de Thomson pero básicamente no el sistema, con lo que a día de hoy aun persiste el sistema de la bitácora con los orificios longitudinales, transversales, el vertical o imán de escora y la barra

Flinders para colocar los imanes compensadores y las esferas, elementos que se tenían en cuenta en la bitácora del siglo XIX.

A partir de ese momento las innovaciones se han ido sucediendo de manera vertiginosa, debido al avance de la ciencia y de la tecnología, derivando a lo que hoy es una forma habitual de posicionamiento como el sistema GPS, influyendo en la decadencia de los sistemas direccionales que dependían exclusivamente del geomagnetismo terrestre, y derivando a una tecnología dependiente de sistemas energéticos periféricos que a veces, más a menudo de lo que en realidad se cree, fallan generando incidentes e incluso accidentes de diversa gravedad.

La garantía de un sistema magnético dependiente solamente de la afección geomagnética de la tierra garantiza en cierta manera que nunca le va a fallar la funcionalidad a la aguja magnética, aguja de marear o brújula.

La más o menos acertada compensación de la aguja magnética nos certifica el mejor o peor direccionamiento de los rumbos de buques para llegar a buen puerto, aún en condiciones en las que nuestros sentidos no son suficientes para garantizar el acierto en las recaladas a los puntos de destino, y por lo tanto desempeñar, con acierto, nuestro cometido de garantizar el transporte de mercancías y pasaje por mar.

3.2.- Interés actual de la compensación de la aguja magnética

En la actualidad, el exceso de instrumental electrónico a bordo de los buques mercantes está originando, por diversas razones, una problemática añadida al incremento de los buques que operan en los siete mares. Entre otras la creencia casi ciega de que los sistemas electrónicos no fallan nunca, principalmente debido a que la tecnología ha evolucionado tanto que la creemos tan infalible como las unidades estelares que se mandan al espacio.

Debido a esta creencia en la infalibilidad, las unidades electrónicas GNSS se ven como la mejor dotación tecnológica que se ha hecho en buques mercantes, de recreo, etc. De ahí se conectan todos los sistemas electrónicos de gobierno, navegación, posicionamiento etc. de los buques. Esto significa, básicamente, que si la unidad principal de posicionamiento, en este caso el GPS falla, el resto de las unidades electrónicas acopladas al primero también fallarán, con lo que el riesgo de accidentes se multiplica exponencialmente.

Todo esto no tendría mayor importancia si el GPS se viera como lo que es: una ayuda a la navegación, igual que otras muchas tecnologías creadas para tal fin, como sistemas Radar, ARPA, Sonda, etc. El hecho es que en vez de tomar estas nuevas tecnologías como simples ayudas al buen hacer del marino, se toman como unidades principales y útiles en todos los términos. El autor en esto discrepa de su importancia, y dice que todo lo que el ser humano es capaz de inventar es susceptible de fallar o ser manipulado.

Los GPSs son aparatos dependientes de energía eléctrica para su funcionamiento. Además de esto, dependen de señales que les llegan desde un sistema de satélites, señales que son procesadas para calcular los diferentes datos que luego se muestran en diferentes pantallas y les sirven al marino para definir sus rutas, así como la seguridad en la navegación, seguridad que afecta a tripulantes, carga y buque, seguridad que se transforma en grandes pérdidas, tanto humanas como materiales, si no se utilizan los datos obtenidos de los GPSs con cierta limitación y cautela.

Más de uno se preguntará cómo es capaz alguien de dudar de la seguridad que ofrecen estas nuevas tecnologías.

Para muestra puede servir un botón, pero el autor muestra por lo menos los botones equivalentes a una camisa, teniendo en cuenta que hay muchísimos ejemplos que apoyan lo comentado y que, con tiempo e interés el lector, se puede cansar de leer casos tanto en la red como en bibliografía escrita.

Así pues solo vamos a hacer un repaso somero sobre las inseguridades de estos nuevos sistemas implementados incluso a receptores terrestres y aéreos.

La potencia de emisión de los satélites emisores es una potencia muy limitada. No poseen generación eléctrica de gran potencia sino que se limitan a utilizar la luz solar para su generación. Las señales de los satélites deben de cruzar diferentes capas antes de llegar al terminal GPS, como la ionosfera, zona ionizada de la atmósfera, troposfera etc. Sobre todo hay que tener en cuenta la zona de la ionosfera que es la que más nos va a afectar en la recepción de las señales de esos satélites y, por añadidura, en la calidad de recepción de dichas señales en los distintos receptores GPS.

Además de lo anterior, hay que tener muy en cuenta las tormentas solares que afectan a las emisiones de satélites e incluso a sistemas eléctricos en tierra.

Aunque los EEUU hayan asegurado su no incidencia en las señales a partir del año 2000, de todos es bien sabido que esas señales son fácilmente variadas por intereses de seguridad nacional americana NSA o disponibilidad selectiva, si ellos lo deciden; de hecho con fecha de enero de 2007 se detectaron grandes fallos en sistemas de navegación terrestres, aéreos y marítimos sin que nadie supiera la razón [51]. Se pueden encontrar múltiples casos de influencia externa en las señales GPS [57].

Se pueden ir añadiendo más casos que nos indican la no integridad de estos nuevos sistemas de posicionamiento. Algunos autores comparan la señal de recepción de los GPS como si fuera la luz de una bombilla de 20Watt¹⁵ apreciada a una distancia de más de 19.000 kilómetros. Por añadidura, un aparato para

¹⁵ Las bombillas que utilizamos en las casas, solo puntualmente son de 100Watt., siendo lo normal de 40Watt. o de 60Watt, y sabemos la capacidad lumínica de las mismas.

interferir con el sistema apenas supera un coste superior de 78 dólares [123]. Con esto, pretendemos identificar las múltiples irregularidades, de que son susceptibles a este sistema que dirige a los diferentes equipos de navegación marítima y que si éste falla o se le hace fallar, lo que en un principio se define como un sistema infalible genera un caos total con una gran posibilidad de generar víctimas, sin contar por supuesto grandes pérdidas económicas.

Con todo esto, los que hemos tenido oportunidad de haber navegado en épocas anteriores sin tanta tecnología, aunque no carentes de ella, siempre hemos tenido la aguja magnética para dirigirnos, la aguja giroscópica como más reciente, aunque dependiendo de la electricidad que se produce a bordo y que es susceptible de alguna eventualidad en el momento menos esperado, y la aguja magnética que, aunque solo aparentemente parece un artilugio antediluviano, resulta, debido a su autonomía el más fiable de que disponemos en estas circunstancias en las que toda la tecnología nos ha dejado de lado.

La aguja magnética cuyo direccionamiento depende exclusivamente del efecto producido por el movimiento magneto-hidrodinámico del geomagnetismo, afectada por la declinación magnética, uno de los factores que distorsionan su orientación, una vez conocida esta, la otra afección es el desvío generado por los hierros del propio buque o de su carga. La aguja magnética y sus componentes de compensación solo obedecen al geomagnetismo y a la capacidad de los imanes correctores, también influenciados por el magnetismo terrestre pero que en nada tienen que depender de energías auxiliares externas para su adecuado funcionamiento.

Teniendo en cuenta que la aguja magnética debe estar siempre en condiciones, debemos ir corrigiendo esos desvíos, manteniéndola debidamente compensada. Hoy en día este instrumento solo se mantiene a bordo por la garantía que supone el portarla para, aún en caso de malfuncionamiento del resto de equipos, podamos llevar a buen término nuestros viajes y transportes. Esta recomendación está estipulada en el convenio SOLAS de IMO. Además está legislado que esta aguja debe estar siempre compensada para que a cualquier rumbo su desvío residual no supere los 3° para lo cual se compensa a tal efecto.

En la actualidad, la mayoría de la gente de la mar no realiza ningún tipo de compensación de la aguja o agujas que se llevan a bordo, relegando toda la importancia a los actuales sistemas eléctrico-electrónicos que, más a menudo de lo

que uno se imagina, son susceptibles de fallar como apunta el Capitán Eduardo Cruz [31].

Los sistemas giroscópicos dejan de funcionar, por ejemplo, si por cualquier causa ajena a su funcionamiento se les corta el suministro eléctrico y los sistemas digitales, incluidos los GPSs, son susceptibles de fallar debido a influencias externas de diversa índole. Sin embargo, la aguja magnética y sus componentes de compensación solo obedecen al geomagnetismo y a la capacidad de los imanes correctores, también influenciados por el magnetismo terrestre pero que en nada tienen que depender de energías auxiliares externas para su adecuado funcionamiento.

La operación real de una compensación es bastante costosa tanto económicamente hablando, cómo por la complejidad del trabajo necesario para realizar la misma. Debido a esta circunstancia, muchos buques suelen tener la tablilla de desvíos residuales anotada (pero no debidamente calculada), para cumplimentar solo con los desvíos remanentes, por lo cual, si realmente tuvieran la necesidad de utilizarla, los resultados serían sorprendentes, cuando no peligrosos, por no haber comprobado adecuadamente si esa aguja requiere de una compensación al margen de la caducidad de su Certificado.

Seguimos añadiendo posibles incidentes acerca de la gobernabilidad de los buques. Imaginemos los grandes buques portacontenedores que hoy en día surcan los mares, a estos les añadiremos, por ejemplo, los buques que se dedican al transporte de coches o mercancía rodada etc., también añadiremos grandes buques de carga a granel que transportan grandes cargamentos de mineral a granel en sus bodegas. El por qué de citar todas estas unidades es básicamente el mejor ejemplo para entender el funcionamiento elemental de las agujas magnéticas y la necesidad de mantenerlas compensadas en todo momento.

Los grandes portacontenedores recorren el mundo secuencialmente descargando y cargando grandes cantidades de unidades contenedoras que no son más que piezas metálicas que, con toda probabilidad, transportan en su interior grandes cantidades de productos metálicos manufacturados o no. Toda esta carga y descarga metálica afecta en cada momento a la aguja, y qué duda cabe que de manera muy significativa, al igual que al inicio de la vida del buque su estructura afectaba a la aguja y había que compensarla para contrarrestar el efecto que dicha cantidad de acero ejercía sobre la aguja. Pero ahora hablamos de operaciones

continuas en el tiempo que afectan constantemente al funcionamiento de la aguja, y que nadie realiza un nuevo ajuste a pesar de esas variaciones de carga, con lo que siempre existirá una aguja magnética descompensada y por supuesto indicando erróneamente su orientación deseada, haciendo de la misma, una aguja no tan servicial en cuanto al desconocimiento de su exactitud se refiere.

Todo lo definido en el párrafo anterior se puede extrapolar perfectamente a multitud de transportes especializados hoy en día y como ejemplo sencillo puede ser el transporte de coches, camiones, cisternas, minerales a granel y un gran sin fin de transportes específicos, que al igual que en el ejemplo del transporte de contenedores afecta sensiblemente al funcionamiento de la aguja magnética de cada buque.

3.3.- Realización de una compensación

En el presente, al igual que hace un par de siglos, cuando se pretende realizar una compensación de la aguja magnética de un buque, del tipo que sea, el proceso es siempre el mismo:

- a) Definir los desvíos de la aguja con respecto a los distintos rumbos que efectúa el buque.
- b) Una vez definidos los desvíos proceder a compensar los mismos si éstos son mayores de 3° , secuenciando las compensaciones de los distintos desvíos hasta minimizarlos, aunque nuestra intención sería dejarlos a cero, cosa imposible.
- c) Una vez compensados los desvíos en su máxima cuantía volver a calcular los desvíos residuales y levantar una tablilla registrando dichos desvíos.

Todo esto requiere un proceso laborioso y costoso que en muchas ocasiones los armadores no están dispuestos a soportar, más que por la obligatoriedad de la reglamentación internacional al respecto, además debido a la periodicidad con la que hay que proceder para dicha operación. Teniendo en cuenta que hoy en día a bordo de todos los buques hay un GPS que no requiere esa obligatoriedad ni siquiera necesidad, se pretende en cierta manera de prescindir de la aguja magnética y de las obligaciones que para con ella se definen para en caso de ser el último reducto esté operativa.

Hay que añadir que para la realización óptima de dicha compensación se suele relegar dicha función a una persona cualificada, como es la figura del compensador, la cual es contratada puntualmente para el servicio concreto, adecuando la aguja a las legislaciones existentes. Los capitanes también estamos capacitados para efectuar y certificar dicha compensación pero nadie prefiere asumir dicha responsabilidad y es la razón principal para que se delegue dicha operación en un compensador profesional.

Para la operación propiamente dicha, el compensador y el capitán (junto con los prácticos del puerto) consensuan la posición en la que se realizará el trabajo, teniendo en cuenta que siempre se efectúan en las proximidades de un puerto y aprovechando su entrada o su salida al mismo. Dicha ubicación por regla general es fuera del ámbito del tráfico general de dicho puerto y con la suficiente amplitud de espacio para poder realizar las mediciones con seguridad, para no entorpecer las maniobras de entrada y salida de otros buques.

Una vez determinado el espacio, se procede a bornear el buque, orientando el buque a distintos rumbos hasta completar un giro completo, esto se puede realizar con ayuda de remolcadores para un espacio reducido o por el contrario por medio de la propia propulsión del buque realizar el borneo para un espacio mucho más amplio que en el anterior. El primer método resulta extraordinariamente caro por lo que en principio siempre se suele desechar, el segundo sistema, más asequible pero necesita un espacio considerablemente más importante que además va en relación al tamaño del buque.

Una vez completado el borneo se procede a calcular los desvíos y a compensarlos con imanes duros que se ubicarán en distintas celdas preparadas a tal efecto en la bitácora de la aguja magnética. A veces incluso se cortan imanes enteros dependiendo de la capacidad correctora que sea necesaria, para conseguir que los imanes puedan compensar lo máximo posible los desvíos calculados.

Después de toda esta operativa se vuelve a bornear el buque para corroborar que los desvíos son menores de 3° (de obligado cumplimiento) y seguidamente registrar cual es el remanente que no ha podido compensarse y que plasmaremos, levantando una tablilla de desvíos residuales que se certificarán y se tendrán en cuenta ante la necesidad de utilización de dicha aguja magnética para orientación en el gobierno del buque.

Una pregunta puede ser ¿Por qué no hemos compensado completamente los desvíos? Debido a que la colocación de los imanes compensadores se realiza ubicándolos en unas celdas predeterminadas a unas distancias concretas desde el centro de la aguja magnética para las distintas celdas, pero entre celda y celda existe un espacio en el cual no se pueden ubicar los imanes. Por lo tanto se pueden colocar en una celda, en la superior o en la inferior, pero nunca en el espacio entre ellas, con lo que se genera un vacío a la hora de afinar el ajuste de ubicar los imanes.

El cálculo de los imanes a utilizar, y la posición donde ubicar los mismos, se realizaban de una forma específica en tiempos de Thomson, al igual que ahora, donde todo se basa en la potencia relativa de los imanes compensadores, que va en relación con la potencia absoluta de los mismos.

Para este cálculo se define como *potencia relativa* de un imán corrector al número de grados que compensa un imán en la hipotética casilla nº 1 en un lugar en el que la componente horizontal H sea cualquier valor.

Se define como la *potencia absoluta* de un imán compensador al número de grados que compensa un imán en la hipotética casilla nº 1 en un lugar en el que la componente horizontal H sea igual a 1

Teniendo en cuenta lo expuesto en líneas anteriores, el autor presupone que esto es un gran error que debería subsanarse, proporcionando tanto al profesional de la mar como en la navegación deportiva, una solución a dicha problemática en cuanto a su operatividad se refiere y dotarle de un elemento menos complejo que el actual que facilite y permita (incluso de forma asistida) ir corrigiendo esos errores que, aun siendo mínimos suponen un gran máximo en inseguridad, generados por la variación cargas, independientemente de seguir requiriendo cada dos años por parte de la administración, la certificación expedida por parte un compensador.

CAPÍTULO 4

OBJETIVOS

En el mundo del transporte marítimo actual, la aguja magnética se ha relegado a una mera obligatoriedad, por exigencias y recomendaciones de los organismos internacionales. Esto está generando protestas en ciertos países, a veces por la inexistencia de profesionales que sean capaces de realizar los ajustes necesarios en las agujas que portan los buques, otras debido a pretender hacer creer que su utilidad resulta nula o casi nula intentando eliminar o aumentar períodos de compensación del instrumento [73], que a nuestro parecer es de vital importancia a bordo de todos los buques.

Como describiremos en este apartado, la dilatación en el tiempo de los períodos de compensación no hace más que generar una inseguridad añadida sobre un instrumento al que hay que vigilar continuamente para conocer sus errores o desvíos y, en caso de necesidad, saber corregir los mismos para tener certeza de la dirección en que se navega.

Actualmente surcan todos los océanos y mares del planeta, buques que debido a las operaciones de carga y descarga de mercancías con diferentes valores magnéticos, provocan una variación en el campo magnético global del buque (al comportarse como el gran imán que afecta al compás magistral). Estamos hablando de buques como portacontenedores, con alrededor o cerca ya! de 20.000 TEUs o grandes bulk-carriers dedicados al transporte de mineral, con más de 150.000 toneladas de carga, o grandes buques de transporte de coches de hasta 8.100 unidades.

Estos grandes buques varían continuamente su carga magnética en gran medida de manera inducida, según las diferentes unidades en el caso de vehículos y contenedores o las grandes cantidades a granel transportadas. Afectando en todo momento a la funcionalidad de las agujas de marear de dichos buques, aguja magnética que principalmente fue compensada, seguramente, en condiciones que poco o nada tienen que ver con las condiciones del momento de la operatividad habitual del buque.

Con esto el autor quiere incidir en la importancia que tiene el que la aguja este debidamente compensada, o al menos que se conozcan, en todo momento los desvíos que tiene la misma tiene a los diferentes rumbos, con lo que verificamos que “un error conocido, no es error” ya que siempre seremos conocedores en caso de necesidad, cuanto y hacia donde corregirla, garantizándonos que será la correcta, la dirección en la que queramos orientar el buque en su navegación.

Si pensamos en un momento en la variación de la carga magnética que reporta un trasvase de contenedores metálicos, y su carga (que también puede ser metálica), estamos en una situación en la que la afección sobre la aguja puede ser tan importante como que el rumbo que indique no se parezca en nada al real que está realizando el buque. En principio esto no reporta un gran problema, siempre y cuando los sistemas eléctricos y electrónicos de a bordo sean fiables y estén totalmente operativos.

En caso que por circunstancias ajenas a nuestra voluntad, fallo en suministro eléctrico, distorsión deliberada de señales satelitales, etc. , ocurra que los sistemas utilizados normalmente no funcionen correctamente, tendríamos que echar mano de la aguja de marear, aguja que debido a la influencia en el momento desconocida para los pilotos, poniéndonos ante una situación embarazosa, que podría resultar incluso peligrosa, en principio para toda la tripulación, por tratarse del factor humano, en segundo lugar para el buque, en cuanto a su integridad y en tercer y último lugar, para la carga con el desastre medioambiental al margen de lo económico.

Con esto reafirmamos que el objetivo de esta tesis es generar un sistema que facilite en todo momento el conocimiento de los desvíos de la aguja magistral, pudiendo mantenerla compensada con un sistema menos complejo al del cálculo habitual de los desvíos de la aguja, todo, a partir de los datos (desvíos y coeficientes principalmente) obtenidos del CMI compass, sistema que existe en la actualidad en el mercado, al ser una patente de la UPV/EHU, que permite el conocimiento de los datos en tiempo real, en cualquier nueva circunstancia después de cambios de carga debido a estiba y desestiba. Por otro lado y es la base de esta tesis, corregir esos errores conocidos por el CMI compass con una disposición de imanes correctores, que no haga pensar demasiado al profesional de la mar y por supuesto como hemos citado en un párrafo anterior, que no tenga que realizar cálculos complejos que resulten engorrosos y que le puedan llevar a generar mayores errores que los que ya acontecen por culpa de cambios de estiba de las mercancías.

Para ello se fijan como objetivos:

- 1.- Sustitución del sistema de corrección existente basado en celdas colocadas a unas distancias determinadas para los imanes longitudinales y transversales, es decir para los desvíos semicirculares, por otro sistema nuevo que tenga un campo

más amplio, con aprovechamiento de espacios intermedios. Para ello, diseñaremos y fabricaremos un dispositivo mediante el cual seamos capaces de realizar una compensación del desvío semicircular completo, que, con unos resultados cuando menos iguales a los estándares conseguidos en la actualidad, se consiga una mejor afinación, en cuanto a resultados finales por la versatilidad de regular en altura el disco principal.

2.- Debido a la capacidad de giro, por el posicionamiento de los imanes, el dispositivo sea capaz de compensar cualquier cantidad de desvío semicircular, incluso valores que actualmente nos resultan complicados en las bitácoras convencionales y no suponga una mayor complejidad. Teniendo indirectamente incidencia en los desvíos cuadrantales al quedar anulados los espacios entre celdas de los imanes de compensación, aprovechando un rango de distancias muy superior al actual, teniendo en cuenta las características de los imanes compensadores. No debemos olvidar que los desvíos semicirculares son los de mayor valor cuantitativo respecto a otros desvíos más pequeños. Con lo que se reduce considerablemente el número de imanes correctores.

3.- Que los cálculos, en vez de realizarlos en función a una potencia absoluta y relativa de los imanes compensadores, se realicen en función del momento magnético de los mismos, convirtiendo de esta manera un conocimiento exclusivamente práctico de relación entre Pa (potencia absoluta) y Pr (potencia relativa), desarrollándolo en un cálculo matemático más exacto. Esto lo efectuaremos generando una fórmula que relacione los valores del momento magnético de los imanes correctores con distintas variables de generación de campos magnéticos.

4.- Comprobar la validez de los resultados, contrastando resultados por métodos algorítmicos y métodos empíricos. De esta manera estudiar la posibilidad de sustituir los sistemas de compensación tradicionales, por otros de mayor exactitud y eficacia que en un futuro puedan incluso automatizarse.

CAPÍTULO 5

MATERIALES Y MÉTODOS

5.1.- Materiales e Instrumentos Utilizados

Los sujetos de investigación y verdaderos elementos protagonistas, son los imanes correctores. Se define imán como cualquier cuerpo que presente propiedades magnéticas creando a su alrededor un campo magnético [34].

Los imanes se pueden clasificar en dos grupos distintos: imanes naturales e imanes artificiales (dentro de este segundo grupo, englobaremos también a los electroimanes). Los imanes naturales son los que poseen esta propiedad por naturaleza, como la magnetita (Fe_3O_4), la ilmenita ($TiFeO_3$) o la hematita (Fe_2O_3) o una mezcla de algunas de ellas. Todas se encuentran en la naturaleza, de ahí su nombre. A los imanes que adquieren esta propiedad por medios externos o algún tratamiento especial se les denomina imanes artificiales [20]. Los imanes artificiales se pueden dividir a su vez, según la capacidad de duración de su campo magnético, en imanes temporales y permanentes.

Los imanes temporales, también denominados electroimanes, son utilizados ampliamente en el mundo industrial (imanes para manipulación de chatarras, etc.) y están contruidos a base de hierro dulce. Hay que tener en cuenta que sus propiedades magnéticas sólo permanecen mientras actúa una acción imanadora exterior de ahí su denominación (normalmente la acción imanadora en estos casos es la electricidad).

Los imanes permanentes [90], son materiales que una vez imantados, mantienen sus propiedades magnéticas, es decir, que éstas perduran aunque no actúe ningún campo exterior imanador. A los imanes permanentes también se les denomina material magnéticamente duro y generalmente tienen una fuerza coercitiva mayor de 120 Oe.

Las agujas, imanadas o imantadas, de las brújulas, se imantan con una corriente eléctrica aplicada sobre el material en la dirección interesada (siempre que se mantenga la temperatura Curie).

También es importante mencionar los imanes permanentes de última generación. En primer lugar tenemos que referirnos a los imanes cerámicos o ferritas.

Los imanes cerámicos tienen como fórmula general Fe_2O_3MO , donde M es un ion metálico divalente, generalmente el bario o el estroncio o cualquier combinación de ambos [119]. Son componentes de calidad que se pueden encontrar en aplicaciones tan diversas como automatización, control, medición, etc.

Los imanes de ferrita pueden ser isótropos, es decir, las propiedades de dichos imanes no dependen de la dirección en la que se midan sus características o, dicho de otro modo, no dependen de los ejes del imán, midiendo lo mismo donde quiera que se mida, o anisótropos.

Por el contrario la anisotropía es la propiedad de algunas magnitudes físicas específicas que tienen valores distintos según ciertas direcciones. Los imanes fabricados para calidades anisotrópicas se consiguen aplicando un campo magnético durante el proceso de prensado (dirección de anisotropía). Y tras un proceso de sinterización (tratamiento térmico a altas temperaturas) se obtienen las piezas con su forma y solidez definitivas pero desimanadas. Mediante un proceso de imantación se consigue el alineamiento de las partículas en la dirección de anisotropía, con las características magnéticas deseadas.

Los imanes de ferrita de estequiometría $BaFe_{12}O_{19}$ o $SrFe_{12}O_{19}$, son óxidos cerámicos de carácter frágil, quebradizo y sensible a golpes o flexiones. Por su gran dureza (Mohs 6-7), deben ser mecanizadas con útiles de diamante. Están compuestos de aproximadamente un 80% de óxido de hierro Fe_2O_3 y aproximadamente un 20% de óxido de bario BaO u óxido de estroncio SrO . Las materias primas son de fácil adquisición y de bajo coste, de apariencia lisa y de color gris oscuro, de aspecto parecido a la porcelana.

Comentar por último sobre este tema que las temperaturas de trabajo de las ferritas se centran principalmente entre $-40^{\circ}C$ y $250^{\circ}C$.

Vamos a hablar ahora de los materiales de imán de tierras raras. En la actualidad pertenecen a tres familias de materiales: Aleaciones 1-5 (tierras raras y Cobalto 5), Aleaciones 2-17 (2 tierras raras y metales de transición 17) y aleaciones de tierras raras e hierro. No vamos a adentrarnos en las especificidades de estos imanes [119].

Los imanes de Neodimio y Samario representan la última generación de los materiales magnéticos. El proceso de fabricación de los imanes de tierras raras [25] resulta bastante complejo. La materia prima necesaria para su aleación tiene que ser mezclada en vacío, combinando entonces las partículas según las tolerancias definidas. Finalmente se sinterizan en unos hornos especiales obteniendo así un producto final extremadamente duro que, únicamente, y de la misma forma que el cerámico o ferrita, se puede trabajar con maquinaria especial provista de herramientas de diamante. Igualmente se utilizan procesos de enfriamientos para su tratamiento que tienen el inconveniente de resultar muy caros.

Los materiales magnéticos compuestos de tierras raras son Samario-Cobalto, $SmCo$ [72], y Neodimio-Hierro-Boro, $NdFeB$, los cuales pueden ser utilizados en temperaturas bajo $0^{\circ}C$.

Dichos imanes poseen propiedades muy superiores a los tradicionales por su alta coercitividad y su elevada remanencia, una fuerza entre 6 y 10 veces superior a los materiales magnéticos tradicionales, como veremos en la siguiente tabla que representa las características magnéticas para los imanes de $NdFeB$ de calidad Nd35 y los de $SmCo$ calidad Sm_2Co_{17} .

Se puede observar que la utilización de este tipo de imanes, está muy condicionada por la temperatura de trabajo. Para los imanes de $NdFeB$ la temperatura máxima de trabajo puede ser de $80^{\circ}C$ a $200^{\circ}C$, para los imanes de $SmCo$ de los $200^{\circ}C$ a los $350^{\circ}C$ [136].

Actualmente también existen imanes elastómeros que se fabrican por aglomeración de partículas magnéticas (hierro y estroncio) en un elastómero (caucho, PVC, etc.) o material flexible que permita la adaptación y manipulación del material. Los imanes flexibles, consisten en una serie de bandas estrechas que alternan los polos norte y sur siendo su campo magnético muy intenso únicamente en la superficie, anulándose esta a una distancia tan pequeña como el grosor del cuero de una cartera. Se utilizan en publicidad y se hacen así con la intención de no dañar la banda magnética de una tarjeta de crédito.

Además de todo lo comentado anteriormente existen otras aleaciones utilizadas como son: cobre/níquel/cobalto y hierro/cobalto/vanadio; en las que destacan las de platino/cobalto para la confección de imanes de muy alta calidad al ser utilizados en relojería, en dispositivos aeroespaciales y en odontología para la

retención de prótesis completas, aunque éstos últimos resulten excesivamente caros [97].

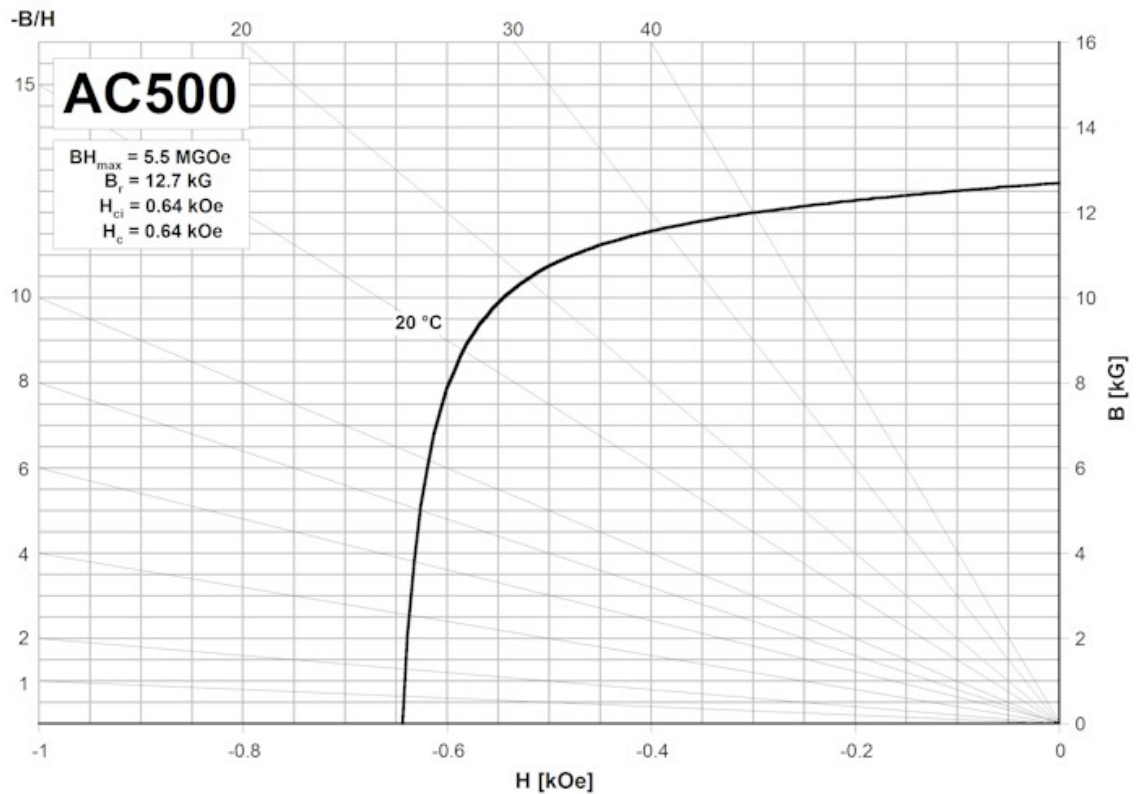
Tabla 1: Propiedades de los materiales magnéticos compuestos de tierras raras de calidad Nd35 y Sm₂Co₁₇.

Propiedad	Nd 35		Sm ₂ Co ₁₇	
	SI	CGS	SI	CGS
Br (remanencia)	1,100 T	11.000 G	1,000 T	10.000 G
Hcb (coercitividad)	840 kA/m	10.550 Oe	740 kA/m	9.300 Oe
Hci(coercitividad intrínseca)	>1.990 kA/m	>25.000 Oe	>2.070 kA/m	>26.000 Oe
BH máx. (producto máx energía)	231 kJ/m ³	29 MGOe	190 kJ/m ³	24 MGOe
Coef. de temp. Revers. De Br	-0,093%/°C (20°C - 80°C)		-0,030%/°C (-20°C - 200°C)	
Coef. de temp. Revers. De Hcj	-0,430%/°C (20°C - 80°C)		-0,019%/°C (-20°C - 200°C)	
Tc (Temperatura de Curie)	590°F	310°C	1517°F	825°C
T _{max} (temperatura máx. de trabajo)	176°F	80°C	662°F	350°C

Acabamos nuestra exposición con los imanes de *AlNiCo* (también llamados NiAlCo). Estas piezas básicamente consisten en Aluminio, Níquel, Cobalto, Cobre, Hierro y Titanio. En algunos grados el cobalto y/o titanio se eliminan. Estas aleaciones también pueden contener partículas de silicio, niobio, circonio u otros elementos que mejoran la respuesta al tratamiento de calor de una de las características magnéticas [119]. Se designa al grupo de materiales magnéticos obtenidos por fusión el tipo RK1. Es con diferencia la gradación más solicitada y está compuesta por Aluminio 8%, Níquel 14%, Cobalto 24%, Cobre (3 – 3.5) %, Hierro 50% y trazas de otros elementos. Dando como resultado la composición magnética que mejor resiste a las altas temperaturas, presentan una gran

estabilidad en temperaturas extremas, manteniendo sus características magnéticas entre -250°C y 450°C . El coeficiente de temperatura reversible para la coercitividad H_{cj} es positivo, esto significa que a medida que se incrementa la temperatura el *AlNiCo* aumenta su coercitividad, lo que es válido en el rango de temperatura de -20°C – 450°C .

Tabla 2: Relación B/H para el *AlNiCo* 500.



El *AlNiCo* es un material muy resistente pero a la vez muy frágil. Este tipo de imanes se utiliza principalmente en aparatos de medición y sistemas de detección por campos magnéticos (pesaje analítico, frenos, etc.). Los imanes de *Alnico*, debido a que se fabrican mediante un proceso de fundición, presentan en bruto un aspecto rugoso y de color oscuro. Con el fin de conseguir un mayor grado de exactitud en las tolerancias del material es aconsejable realizar un proceso de rectificado.

En el supuesto de necesitar algún tipo de modificación, en cualquier formato de diseño elegido, únicamente se podrá efectuar durante el proceso de fundición, dándole la precisión requerida final, mediante herramientas de diamante o

carborundo o polvo de zafiro. Tienen como particularidad, que no presentan ningún tipo de problemas de oxidación.

Tabla 3: Propiedades del AlNiCo 500.

	AlNiCo500	
Propiedad	SI	CGS
Br (remanencia)	1,240 T	12.400 G
Hcb (coercitividad)	48 kA/m	600 Oe
Hci (coercitividad intrínseca)	48,8 kA/m	610 Oe
BH máx. (producto máx energía)	39,8 kJ/m ³	5,0 MGOe
Coef. de temp. Revers. De Br	-0,02%/°C (20°C - 450°C)	
Coef. de temp. Revers. De Hcj	+0,01%/°C (20°C - 450°C)	
Tc (Temperatura de Curie)	1580°F	860°C
T _{max} (temperatura máx. de trabajo)	797°F	425°C
Densidad	7,3 g/cm ³	
Dureza Vickers	500 – 600 HV	
Resistividad Eléctrica Específica	0,5 x10 ⁶ Ωcm	
Permeabilidad relativa μ _{rel}	3 – 4,5	

Debido a la particularidad de nuestra investigación, el autor ha seleccionado los imanes de *AlNiCo* debido a su facilidad de adquisición, a su precio, bastante asequible, y porque poseen una permisividad de trabajo a temperaturas adecuadas a los entornos en los que se van a utilizar, normalmente. Las características de dichos imanes son buenas como se puede comprobar en la [Tabla 3](#) Los imanes de este tipo que emplearemos en nuestro trabajo son cilíndricos de 4 cm de longitud y de 4 mm de diámetro.

Adentrándonos por fin en nuestra investigación. Debemos señalar que para la fijación y utilización de dichos imanes hemos tenido que idear, diseñando y fabricando un soporte específico que se adapte a los intereses de funcionamiento, así como la manipulación de los mismos.

Para ello hemos tenido muy en cuenta la utilización de materiales antimagnéticos, buscando la no interferencia en los resultados que surjan de dicha investigación. Para tal fin hemos decidido utilizar aluminio específico y soportes realizados en metacrilato. Los tornillos utilizados, debido a su pequeña medida, se han solicitado a una empresa específica, y son también de un material plástico, o latón por lo que la totalidad del soporte es antimagnético.

El soporte se compone de dos placas laterales de aluminio de 50mm de ancho y 390mm de largo y de 10mm de espesor, una placa transversal del mismo tipo de 50mm de ancho y de 210mm de largo, con un espesor de 10mm y una base también de aluminio de 230mm x 100mm y de 30mm de espesor donde se unen los dos laterales y se apoya el eje principal.

El cuerpo principal, consta de un eje tubular roscado de aluminio de 30mm de diámetro que se apoya en la base. Entre la base y el eje se ha colocado una arandela de teflón, para minimizar el rozamiento, así como en la parte superior, en un agujero practicado en la placa transversal que sirve de soporte en el giro al eje principal, con un mango de manipulación cilíndrico también de aluminio en la parte inferior del eje principal.

El plato principal, es de metacrilato de 230mm de diámetro y de 7mm de espesor sobre el cual se han practicado 4 agujeros en los que se sitúan los soportes de los imanes, con posibilidad de girarlos y hacerlos firmes en su posición definitiva.



Figura 5.1: Despiece del plato de compensación y su distanciador. Fotografía del autor.



Figura 5.2: Despiece del soporte del plato de compensación. Fotografía y soporte del autor.

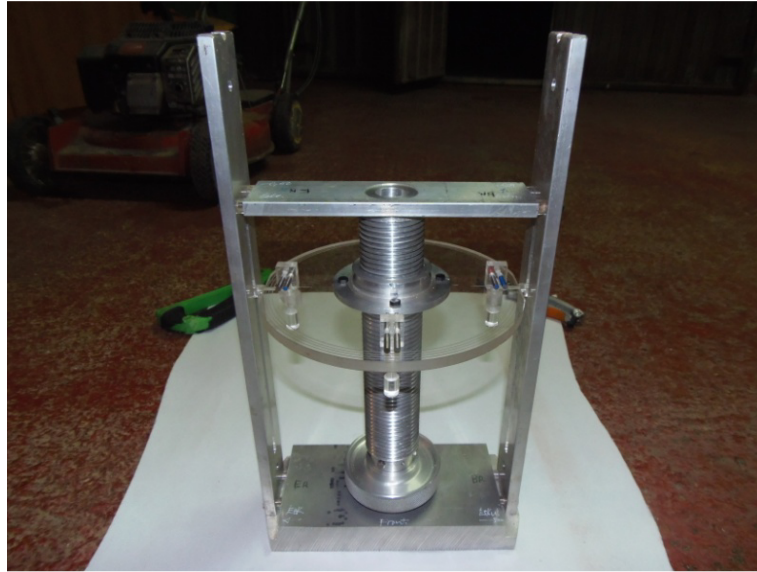


Figura 5.3: Soporte y plato de compensación montado completo con imanes incluidos, listo para colocar en la bitácora. Fotografía y soporte completo del autor.

El autor utilizará varios equipos eléctrico-electrónicos adicionales, que ya han sido utilizados con antelación, en otras pruebas y con otros intereses, pero que vuelven a estar operativos y son de necesidad para la óptima ejecución de la investigación. Minimizando de esta manera los costes de la experimentación.

Se utilizará también una aguja magnética estándar que además será el sujeto sobre el que se vayan a medir las repercusiones de los imanes correctores. La aguja de referencia, aunque estándar de mercado, difiere de las utilizadas en navegación deportiva, definiendo de esta manera la mayor importancia, en un principio, de la primera sobre la segunda en el tipo de navegación, oceánica o de altura, sobre la que priorizamos para esta investigación. Es una aguja que cumple con los requisitos exigidos por la Directivas y especificaciones ISO para equipos marinos (*Council Directives for Marine Equipment and ISO specifications*).

En segundo lugar el autor hace una indicación sobre los imanes correctores que va a utilizar. La elección de los imanes correctores de Alnico, aleación de aluminio, níquel y cobalto es debido a su precio más que asequible a la economía de la que se dispone para tal fin, y por tratarse además, de las mejores características en relación calidad/precio. Por añadidura pongo una nota sobre lo que es interesante en este tipo de imanes que se utilizan para las compensaciones, como las antes citadas: coercitividad y remanencia de dichos imanes, definidos como imanes duros, con los que se lleva a buen término el experimento. La cruda realidad es

que toda la serie de imanes que se van a utilizar son regalo de la empresa Autonautic Instrumental, sita en Barcelona.

Para clarificar un poco la remanencia y la coercitividad debemos referirnos al fenómeno de la histéresis magnética que tiene una gran importancia en los materiales magnéticos.

Entendiendo por histéresis, que en general, significa permanencia o retraso. La histéresis es el fenómeno de inercia por el cual un material ofrece resistencia a un cambio, tiene una tendencia a conservar sus propiedades. De esta manera hace que el proceso de variación sea distinto en un sentido, que en el contrario.

Después de someter a una sustancia ferro-magnética a la acción de un campo magnético, cuando este desaparece, la sustancia, manifiesta todavía un cierto nivel de inducción magnética, que denominamos magnetismo remanente.

La curva de la figura siguiente representa la imantación de una sustancia ferro-magnética que inicialmente se encontraba completamente desimantada, que era virgen magnéticamente hablando, y en la que se ha aumentado la excitación magnética o intensidad de campo magnético $+H$ de manera continuada a partir del estado nulo. Esta curva se denomina curva de primera imantación. Al llegar al punto (a) se alcanza el valor máximo que se denomina imantación de saturación. Punto a partir del cual aunque se aumente la excitación magnética, la imantación no varía.

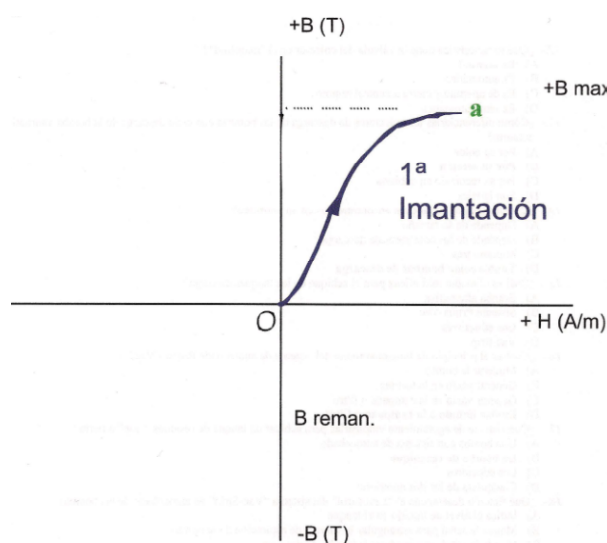


Figura 5.4: Fase inicial de imantación de un material ferro-magnético denominada curva de primera imantación.

Si a partir de este punto (a) comenzamos a disminuir la excitación del campo, al disminuir la corriente, disminuye la densidad de flujo $+B$, pero no en la misma proporción que antes, sino que experimenta una inercia a la desimantación, de forma que, cuando la excitación del campo se ha anulado, la sustancia aún conserva una cierta imantación, o coercitividad. En el punto (b) se ha anulado la intensidad de campo, pero la inducción $+B$ permanece, ya que existe un magnetismo remanente B_{rem} (tramo a-b).

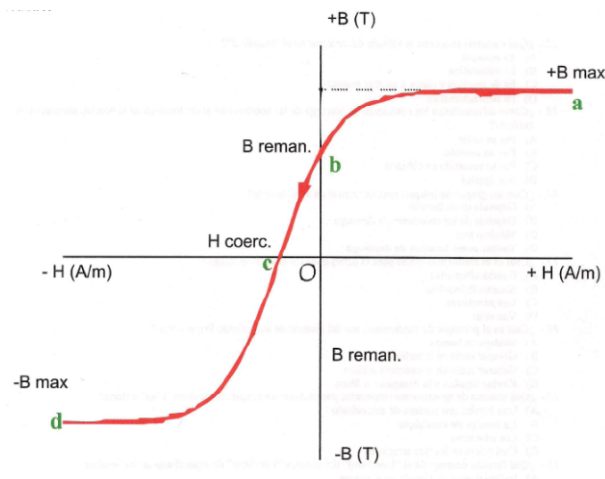


Figura 5.5: Fase segunda de desimantación e inversión del campo magnético y saturación negativa.

Para anular este magnetismo remanente debemos invertir el sentido del campo magnético. Esto se logra si invertimos el sentido de la corriente (tramo b-c). En el punto (c) tenemos que la inducción es cero. Para lograrlo hemos aplicado una intensidad de campo $-H_c$ llamada intensidad coercitiva. Si continuamos aumentando la corriente negativa, llegamos a un punto de saturación (d) contraria a la anterior (a).

Si a partir de este punto, invertimos o disminuimos de nuevo la corriente, logramos completar el ciclo de histéresis pasando de nuevo por un punto (e) de magnetismo remanente y de valor $-B_{rem}$. Como se observa, la curva no pasa por el punto (o) a causa de la histéresis.

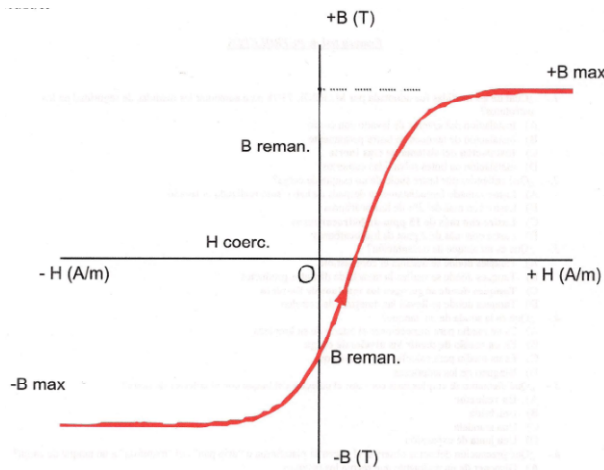


Figura 5.6: Fase tercera de cierre del ciclo de histéresis.

Para desimantar completamente un material ferro-magnético debemos repetir un cierto número de veces el ciclo, haciendo que la intensidad en cada inversión sea más pequeña.

Las características de la curva, nos definen el tipo de material y sus variables magnéticas.

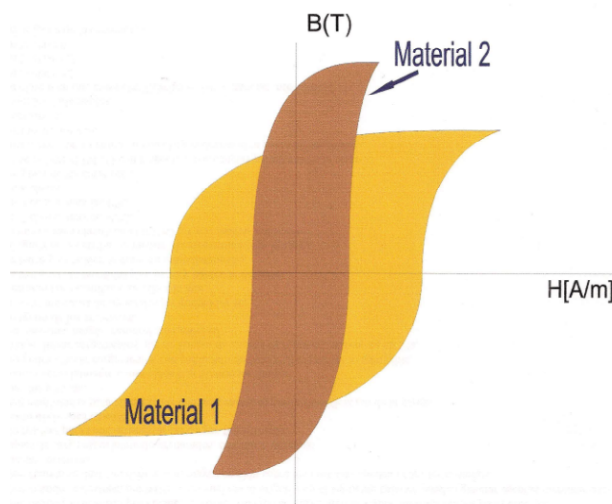


Figura 5.7: Gráficos representando dos tipos de materiales, duros y blandos.

El material 1, es un material definido como magnéticamente duro, mientras que el material 2, se define como material magnéticamente blando. De las características de las curvas vemos que los materiales denominados duros tienen una mayor remanencia y una mayor coercitividad, que son las dos características que nos distinguen los imanes duros de los imanes blandos.

También vamos a utilizar un *fluxgate* o magnetómetro, elemento que consiste en un sensor magnético, que se coloca en el centro, en el exterior, de un compás y contiene una bobina de inducción magnética altamente sensible que detecta y sigue el movimiento de la aguja. El sensor, se monta concéntricamente con la aguja, por lo general dentro de bitácora y pegada al mortero de la misma. Este, recibe la señal del magnetismo de la aguja y a través del TMC-Converter que se utiliza para recoger la señal de rumbo magnético y convertirla en una señal digital, es decir lo transforma en señal seno-coseno o actualmente NMEA 0183 con los datos del rumbo, pudiendo ser enviada a otros aparatos electrónicos para su comparación

El NMEA se creó para el intercambio de información digital entre productos electrónicos marinos. El primer protocolo estándar se llamó NMEA 0183, y es el que todavía se utiliza y aceptan la mayoría de los equipos electrónicos que llevamos a bordo. Es un protocolo que define los requerimientos de datos y tiempo de transmisión en el formato serial a una velocidad de 4800 baudios (bits por segundo). La Norma también define que cada equipo sea emisor de NMEA y pueda ser escuchado por muchos receptores, fundamento del protocolo NMEA2000.

Por lo tanto y como hemos dicho anteriormente también precisará de un TMC para que la señal que emana del *fluxgate* se transforme en una codificación NMEA y la salida de éste se pueda leer en un lector digital de manera normalizada.

Un compás satelital, en este caso aparato perteneciente a anteriores proyectos del director de esta tesis, y que se han utilizado con éxito en otras experimentaciones para el perfeccionamiento del CMIcompass. Es el modelo JLR-30 GPS Compass de la compañía JRC Modelo tri-antena específico para el estudio que queremos realizar.

El procesador está integrado en la antena, por lo que no es necesario alinear la antena y el procesador como cuando se encuentran en sistemas separados. Esto contribuye a que la configuración resulte más sencilla, con menor margen de error, y reduce significativamente el tiempo de instalación. Los costes de instalación también se reducen gracias a que solamente se precisa un cable entre la antena y la unidad de presentación. La carcasa exterior del nuevo sistema de antenas de JRC tiene una superficie “deslizante” que hace casi imposible que se posen las aves sobre ella o que queden cubiertas por nieve. Si hubiera algún obstáculo en la

cobertura, este nuevo diseño en el modelo de antena de JRC, incorpora una capa de aire que reduce los posibles puntos ciegos, proporcionando así un rumbo más preciso que los sistemas convencionales.

De forma tradicional, los medios utilizados para medir el rumbo de un barco han sido el compás giroscópico, electro-mecánico o el compás magnético magistral convencional.

Luego el autor se proveerá de un CMI compass, invento del compañero del autor y director de esta tesis de lo que me veo afortunado, que fue patentado por la UPV/EHU. Este innovador equipo, actuará de receptor de distintas señales de los diferentes equipos, se conectará con los sistemas definidos anteriormente y proveerá, mediante cálculos algorítmicos en tiempo real, de todos los desvíos que se sucedan a todos los rumbos que desee realizar la experimentación, valores de desvíos que luego utilizará para realizar la compensación de los mismos para todos los rumbos a los que afecte.

Todos estos sistemas conectados y en funcionamiento, proveerán al autor de los datos, que si utilizara equipos estándar le obligarían a realizar ingentes operaciones matemáticas a fin de obtener los desvíos originales en primera instancia, así como los correspondientes coeficientes y las operaciones posteriores para la compensación con el fin de corroborar la efectividad de la misma realizada con los métodos estudiados en laboratorio.

Una vez adquiridos los datos de los desvíos, aplicará los procedimientos necesarios con el nuevo sistema para su compensación.

Los resultados de la aplicación matemática generada en laboratorio así como sus resultados, espera el autor que sean los mismos o casi idénticos que los físicos aplicados en el nuevo sistema de compensación. Debiendo ser 100% o casi eficaz, ya que los cálculos matemáticos tienen que dar resultados muy ajustados en cuanto a distancias desde los imanes compensadores y posicionamiento de los mismos.

Esto último es la ventaja, lo más creativo de la investigación y la innovación del sistema de compensación. Se deja de lado el cómo se realiza la compensación en la actualidad, de una manera aproximada y bastante compleja, y se renueva con un

sistema más exacto y más cómodo en su utilización, incluso para gente que no esté habituada a estas operaciones.

Después de una de las diferentes pruebas, realizadas a bordo del barco *supply* "Villa de Portugalete", vemos que los resultados difieren mucho de lo que se creía que iba a ser. Después de verificar diferentes opciones, se identifica el factor de influencia del gran error que aparece en las lecturas. La proximidad de ciertos instrumentos de navegación, las periferias férricas en las cercanías de la nueva posición de la nueva bitácora y otros temas varios hacen que el funcionamiento de la aguja se vea comprometido.

Para la realización de las pruebas que nos permitan determinar la correcta funcionalidad del prototipo, tomamos la determinación de ubicarla en un lugar lo mas "aséptico" posible magnéticamente hablando. El autor cree que en un lugar de su propiedad puede definirse que presenta todas las garantías de que no presente ninguna afección exterior.



Figura 5.8: Fotografía de la pseudo-bitácora de pruebas.

Para realizar las pruebas primarias se elige un lector, receptor captador de campos magnéticos, *fluxgate* o magnetómetro. Se utiliza un *flux* tipo pastilla como el de la figura siguiente.



Figura 5.9: Fotografía de la pastilla fluxgate.

Es una pastilla que se sujeta mediante un disco base dentro del cual se ubica la misma y se puede girar para colocarla en la posición de orientación correcta y se afirma con tres prisioneros sobre la base de bronce.

Se provisiona de cuatro imanes correctores con el mismo momento magnético para la realización de la prueba de compensación.

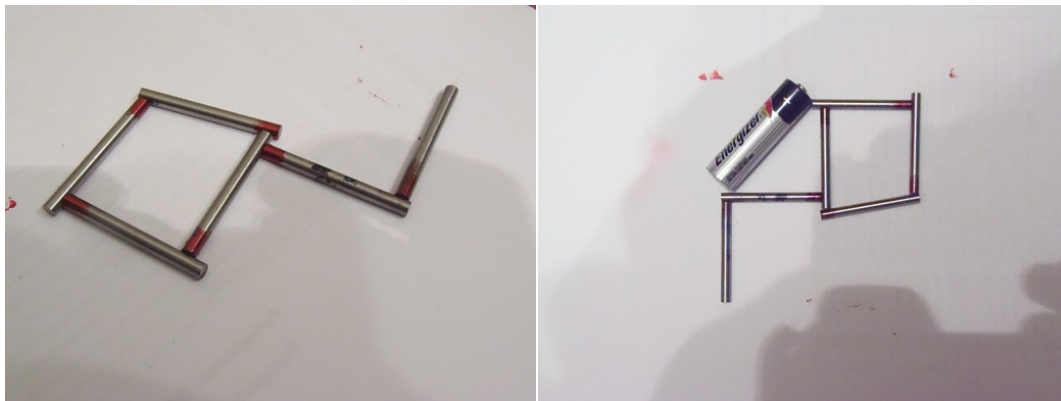


Figura 5.10: Fotografía de los imanes correctores y referencia de su tamaño.

Al equipo hay que añadirle el aparato de invención anteriormente citado patentado en España, para Europa y EEUU. Este aparato tiene como función principal calcular los desvíos que se producen en los compases magnéticos de los buques en tiempo real. Nosotros lo vamos a utilizar para contratar los diferentes valores que nos suministre.



Figura 5.11: Fotografía del CMI compass. Fuente Aitor Martinez-Lozares

En el presente caso, nos va a servir para realizar la lectura de una aguja magnética y sus variaciones, cuando se vea afectada por distintos campos magnéticos, incluido el campo magnético terrestre. La pastilla, sigue a las variaciones magnéticas que surgen de la aguja y las emite en valores analógicos. La salida conectada a un TMC-Converter que es un convertidor de señal analógica a digital, salida NMEA0183, es la que vamos a poder procesar en el CMI para realizar la lectura en pantalla.

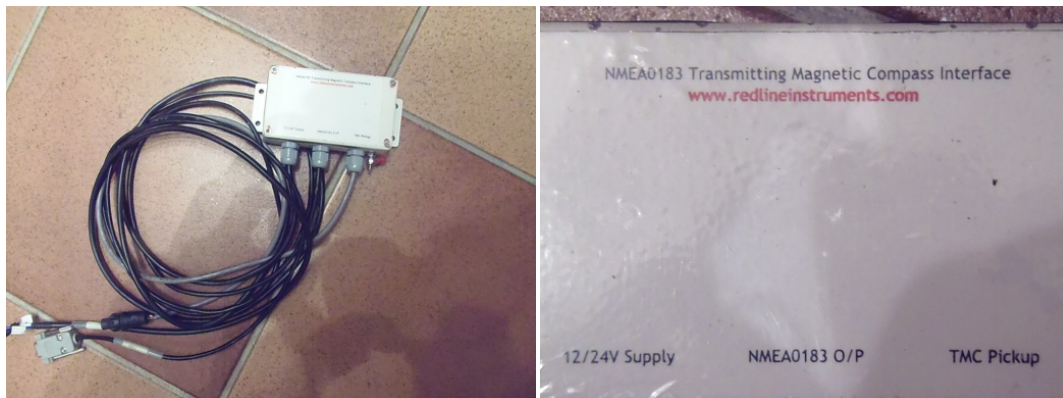


Figura 5.12: Fotografía del TMC que vamos a utilizar. Fuente Aitor Martinez-Lozares.

Se posiciona el *flux*, centrado en el mortero del compás, para verificar a distintas distancias el efecto sobre el *flux*. Anticipamos algunas pruebas que se verán mas tarde en los resultados. Se realizan diversas mediciones, comparándolas con los obtenidos matemáticamente, dándonos cuenta de que hay algo erróneo en el sistema. Se recogen valores que difieren de los resultados sin ninguna regularidad.

Se procede a verificar el funcionamiento de los instrumentos utilizados y se demuestra que la pastilla *flux* no funciona correctamente.

Buscamos una solución y el compañero informático Ricardo López, colaborador desde los comienzos, nos da la solución, cediéndonos para su utilización en las pruebas, un *flux* electrónico que nos puede solventar la situación. Una vez puestos en contacto con los distribuidores del instrumento en EEUU, confidencialmente nos suministra cierta información necesaria para la experimentación y una fotografía del aparato para poder utilizarlo en la tesis.



Figura 5.13: Fotografía del flux electrónico FG1-045 MK2 de Red Line Instruments. Deferencia de Chris Cole

Este *flux* electrónico ya viene preparado con salida NMEA0183 para poder leerlo en el CMI. El nuevo instrumento en cuestión es el FG1-045 de Red Line Instruments.

Una vez sustituido el antiguo procedemos a colocar el *flux* en el centro de la bitácora para poder realizar las mediciones. Para ello el autor tiene que fabricar otra pieza para que el *flux* quede perfectamente centrado con respecto al campo magnético que genere el plato de los imanes correctores.

El soporte centrador está construido en materiales libres de magnetismo, Acero inoxidable antimagnético y varillas roscadas de latón.



Figura 5.14: Fotografía del flux con la pieza de centrado y soporte. En la otra fotografía instrumento con cableado a utilizar.

Se pone a prueba el instrumento y las lecturas son correctas. El instrumento tiene dos botones en la parte inferior para poder ajustar el cero o Norte, u otro rumbo determinado. Son los botones blancos que aparecen en la figura 13 izquierda.

Vamos a hacer también una pequeña puntualización. Al CMI se le conecta un instrumento intercomunicador vía Internet con una tarjeta SIM, sistema como el de los teléfonos móviles. Es una conexión más segura que el sistema Wi-Fi ya que el aparato está conectado a través de cable, para que el compañero y amigo Ricardo López, pueda en cualquier momento realizar una grabación a distancia sin tener la necesidad de estar presente en el lugar de la experiencia. De esta manera podemos comprobar que un instrumento completo colocado en cualquier buque pueda ser estudiado a distancia sin estar en el propio buque e incluso informar al personal del buque la operación a realizar para poder compensar la aguja magnética.

Colocamos el sensor en el centro de la pseudo-bitácora, adaptándolo el sensor directamente al CMI, por lo que prescindimos de la utilización de la pastilla flux y de su TMC por ser incorrectos e innecesarios como se ha comentado anteriormente.



Figura 5.15: Fotografía del HUAWEI Mobile WiFi E5372

Conectamos a un sistema de corriente y comenzamos a realizar las mediciones. Estas mediciones se harán en los valores que definamos de los valores emanados del cálculo matemático desarrollado. Se posicionará el plato y los imanes a distintas distancias del centro del *fluxgate* y leeremos las lecturas que nos de el sistema en la pantalla del CMI.

5.2.- Parte experimental a bordo de buques

5.2.1.- “Ortze” (Pruebas iniciales)



Figura 5.16: Fotografía de J. Pons en Pasajes. Fuente: Baixamar.

Para la realización de la experimentación en campo, se contacta con el IES Náutico Pesquero de Pasaia—Blas de Lezo, teniendo el visto bueno por parte de la dirección de dicho centro en noviembre de 2013. Coordinados con los responsables del manejo de la embarcación, Patrón y Maquinista, instalamos a bordo los equipos correspondientes; permitiéndonos realizar algunas salidas, para realización de pruebas y obtención de datos. Siendo de enorme agradecimiento por nuestra parte dicha disponibilidad.

Disponen de una embarcación apropiada por tamaño y fabricación que es muy óptima para la realización de las pruebas de campo en las que estamos interesados.

El “Ortze” es una embarcación de 20 m. de eslora y 6 m. de manga, con un calado máximo de 2,8 m.

Se utiliza para la realización de prácticas reales con alumnos de dicho centro, tanto de navegación como de pesca. Está preparado a tal efecto con todo tipo de instrumentación de navegación como de artes de pesca. Es un buque de casco de aluminio, pero que a efectos de nuestro experimento de campo no influye para nada.

Buque con puente cubierto donde se dispone de AIS, ECDIS, Sonda, Girocompás con piloto automático, GPS, compás satelital, etc. Estando equipado más de lo necesario, para lo requerido para nuestras pruebas de campo.

Adjuntamos las características de dicha embarcación:

Categoría: Organismos oficiales

Naviera: Gobierno Vasco

Tipo de Buque: Buque Escuela de Pesca

Tonelaje: 27

Propulsión: Guascor E-318TA3-SP

M.M.S.I.: 224496000

Astillero: Ascorreta Naval C.B., nº C-112

Lugar de Fabricación: San Sebastián

Año: 1997

Se procede a colocar el prototipo de bitácora en noviembre de 2013 para tenerlo listo lo antes posible para iniciar las pruebas. El prototipo consta de una unidad de correctores y un tubo de PVC de gran sección que hace la función de bitácora.

Se busca un emplazamiento adecuado para la nueva bitácora en el buque, de manera que podamos utilizar la propia aguja del buque para realizar los experimentos. Con anterioridad se ha instalado un GPS satelital, por cuenta de la

Escuela, con lo cual contamos con una señal giroscópica, una señal GPS y una señal magnética para realizar los cálculos necesarios para la experimentación.



Figura 5.17: Fotografía del espacio libre para el emplazamiento de la nueva bitácora.

El espacio comprendido entre la magnética original del "Ortze" y el pedestal de soporte de la antena del GPS satelital, se ve suficiente y en buena posición al estar en crujía, de manera que el compás magnético se pueda reubicar de la bitácora reglamentaria a la nueva bitácora, de manera rápida y cómoda.



Figura 5.18: Fotografía con la ubicación de la nueva bitácora en relación con la original y en el emplazamiento definido del "Ortze".



Figura 5.19: Fotografía de la bitácora y aguja originales del buque “Ortze”.

En la imagen anterior podemos apreciar, marca y modelo de la aguja magnética que será la que nos sirva para realizar las pruebas de ajuste, que hemos determinado. Las secciones de tubo laterales están colocadas a modo de correctores de hierro dulce, equivalentes a las esferas de las bitácoras estándar.

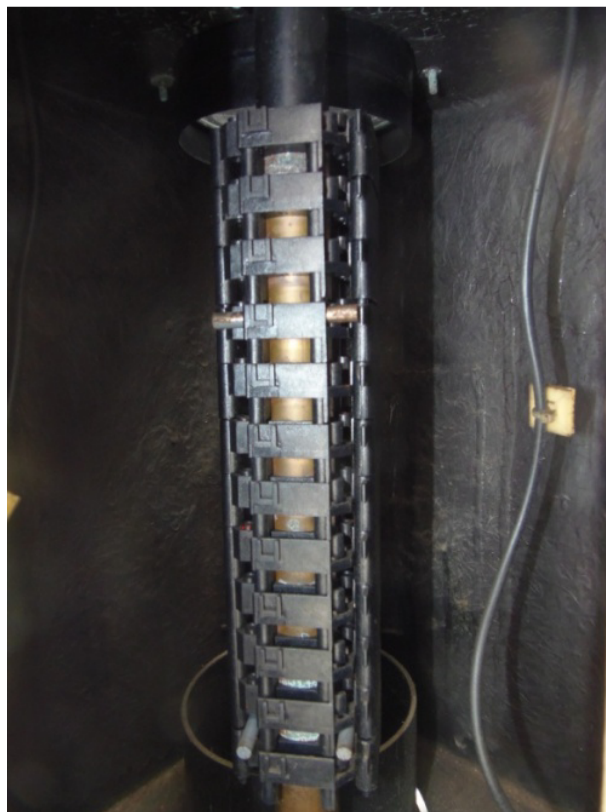


Figura 5.20: Fotografía del sistema de compensación de la aguja del “Ortze” con sus imanes compensadores en posición.

Esta columna de la imagen superior es el sistema para la colocación de imanes correctores compensadores de la bitácora del "Ortze". Se puede ver claramente un imán transversal, en la parte superior de la imagen, y dos imanes longitudinales, en la parte inferior de la imagen. En el centro del soporte de correctores se vislumbra un tubo que además de realizar la función de soporte de los imanes duros, también podemos visualizar el tubo en el interior de la estructura donde va el cilindro con los imanes correctores correspondientes a la escora.



Figura 5.21: Fotografía de la instalación realizada para la nueva ubicación del pseudo-compás en la misma.

En la imagen superior se ve al autor de la tesis, realizando las conexiones del *fluxgate*, con la instalación del CMI compass. La aguja del "Ortze" se ha reubicado en la bitácora prototipo de nueva construcción que lleva acoplado en su interior el nuevo sistema de compensación.



Figura 5.22: Fotografía de la conexión del cable del “fluxgate” a la instalación del buque y al CMI.

En la imagen superior se ve la conexión realizada del *fluxgate* de la aguja magnética del “Ortze”.

Se ha colocado un CMI compass, que servirá para la recepción, cálculo y seguimiento del muestreo de los diferentes resultados. A este CMI irán conectados todas las señales de los diferentes instrumentos anteriores.

El CMI compass, se instala en el puente del “Ortze” para tener en todo momento los desvíos calculados a todos los rumbos a los que se ha gobernado.

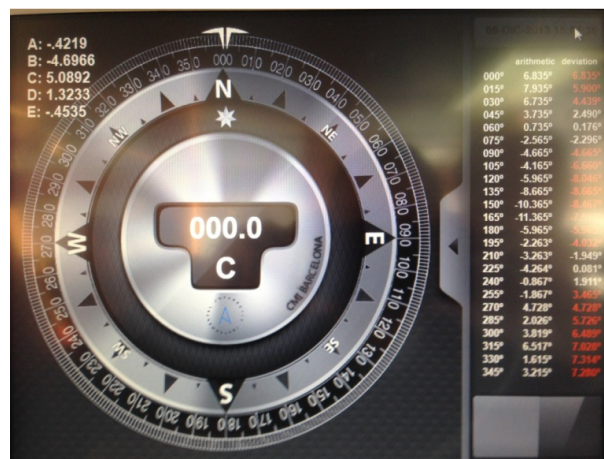


Figura 5.23: Fotografía con la imagen de una captura de la pantalla del CMI compass.

Como tenemos la posibilidad de tener posición de GPS, así como la ruta realizada, tomamos también una instantánea desde el ECDIS del área donde se ha realizado la prueba.

Vemos claramente que la ruta realizada se hace hacia el Oeste desde la salida del puerto de Pasaia hacia la bahía de Donostia. En dicha bahía en suma de los distintos rumbos relacionados con la navegación se ha realizado un borneo completo hasta completar los 360° de giro, con lo que tenemos calculados, automáticamente todos los desvíos que presenta la aguja del “Ortze”.

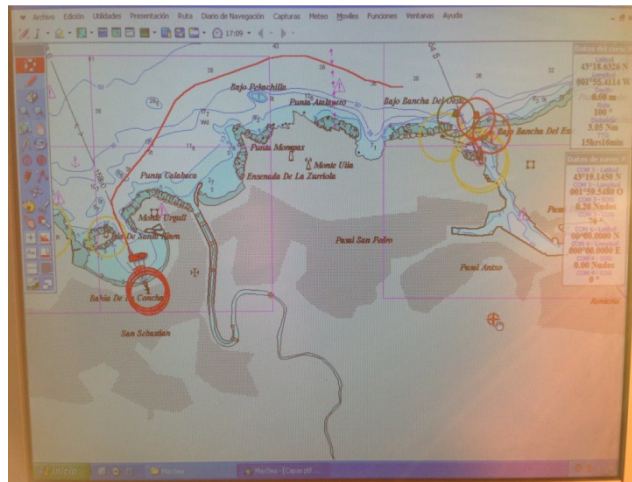


Figura 5.24: Imagen de captura de una pantalla del ECDIS del “Ortze”.

Esta primera prueba se realizó el 9 de diciembre de 2013. La ruta realizada se ha mostrado en la imagen anterior del ECDIS del “Ortze”. Los resultados arrojados, en cuanto al conocimiento de los desvíos de la aguja del “Ortze” han sido los siguientes:



Figura 5.25: Fotografía de la captura de la pantalla del CMI con los desvíos registrados por el mismo.

En la imagen superior se ven los resultados registrados según realizábamos la navegación de Pasaia a Donostia. En el momento del registro, el rumbo al que navegábamos es un casi Oeste magnético, como lo indica la "C" debajo del rumbo 259,7 que es la abreviatura de "compás"

En la columna de la derecha vemos una serie de números que son los distintos rumbos y los desvíos capturados, aparecen en color rojo, ya que el equipo permite marcar el rango de tolerancia aceptada por la administración, en este caso al tratarse de un buque menor a 89,5 m. están aceptados desvíos hasta 4º.



Figura 5.26: Fotografía del detalle de la captura de la pantalla del CMI con los desvíos captados por el mismo.

En la parte superior izquierda vemos los distintos coeficientes del desvío calculados a razón de los desvíos capturados en la columna de la derecha.

Es preciso comentar que los resultados, aunque exagerados (debido a no estar compensada la aguja en el momento de la captura), son reales, al realizar la prueba con los imanes correctores posicionados en situación de corrección máxima, con lo que los resultados que aparecen en la pantalla indican el efecto que ya ha realizado el campo creado por los correctores, además de la afección de los imanes compensadores colocados en la bitácora original a popa del prototipo.

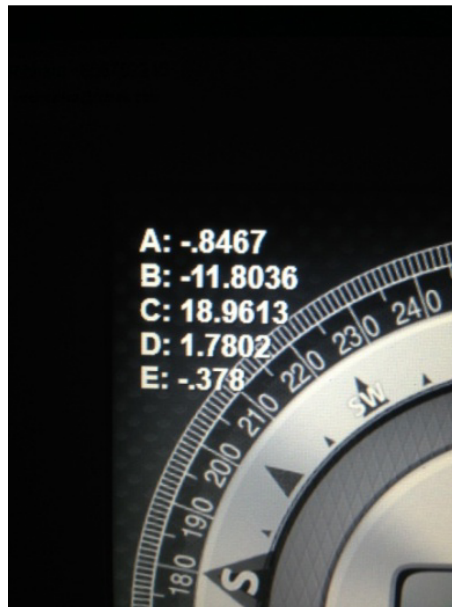


Figura 5.27: Fotografía del detalle de la captura de la pantalla del CMI con detalle de los coeficientes registrados por el mismo.

Esta prueba se realizó, para constatar dicha afección en una posición máxima de los correctores en el prototipo. Comprobando de todas maneras que el CMI se encontraba en correcto funcionamiento, registrando adecuadamente los datos que necesitábamos en tiempo real.

Por motivos ajenos a esta tesis, y tras varias visitas al “Ortze” no pudimos disponer desgraciadamente por más tiempo de la embarcación, teniendo que buscar otra, que nos permitiese el salir a navegar. Percance que nos llevó a contactar con SEGEMAR, quien nos permitió (previa descripción detallada de todos los equipos y asegurando la completa integridad y no manipulación del resto de sus equipos, a excepción del compás), instalar el prototipo de la nueva

bitácora para poder realizar las siguientes pruebas. Aprovechando las salidas que efectuaban para realizar sus servicios habituales a los buques fondeados.

5.2.2.- “Villa de Portugalete” (Pruebas definitivas)



Figura 5.28: Fotografía de la lancha de amarre y servicios portuarios “Villa de Portugalete”. Fuente: Impresa en fotografía.

Después de una búsqueda complicada, y realizados infinidad de contactos, se encuentra un buque que es más que interesante para nuestro fin, y la predisposición de sus armadores a ponerse a nuestra disposición siempre que su trabajo no se viera interferido por nuestras preparaciones.

El “Villa de Portugalete” es un buque de mayor tamaño que el “Ortze”, con una construcción completa en acero, que es interesante para nuestras pruebas, con una eslora total de 22 m. una manga de 7 m., y un puntal de 3,4 m.; su calado de proyecto es de 3 m.

Con estas características el “Villa de Portugalete” es una unidad que es especialmente interesante para realizar nuestras pruebas de campo.

Quedamos completamente agradecidos y comprometidos, al igual que con la Dirección y Personal de la Escuela de Pasaia, con los Armadores, Gerencia y Personal de la compañía armadora del “Villa de Portugalete”, Servicios Generales

Marítimos S.A., además de habernos permitido la utilización del mencionado buque, para la continuación de futuras investigaciones a partir de la realización de esta tesis, dejando instalados los diferentes equipos para su aprovechamiento a bordo y utilización en posteriores pruebas.

Adjuntamos las características de dicha embarcación:

Naviera: Servicios Generales Marítimos S.A.

Tipo de Buque: Lancha de Amarre y Servicios Portuarios

Tonelaje: 111

Propulsión: Mitsubishi S12A2- MPTA

M.M.S.I.: 224076640

Astillero: Astilleros Piñeiro S.L.

Lugar de Fabricación: La Guia-Meira, Moaña, Pontevedra

Año: 2001

Este buque, se dedica a diferentes servicios portuarios, de los que principalmente, entre otras, tiene asignadas las funciones de suministrar provisión a los buques y transporte de pasajeros y tripulantes de los buques a tierra y viceversa.

Comentamos con los gestores la necesidad de la colocación de ciertos instrumentos eléctricos y electrónicos en la consola del buque, así como una antena satelital.

Se toman distintas medidas y se comenta con la tripulación la ubicación más idónea de dichos instrumentos, para que a su vez como ya hemos comentado antes, puedan ser de utilidad a la tripulación en caso de que se requiera.



Figura 5.29: Fotografía del puente y consola de gobierno del “Villa de Portugalete”.

Consensuada, la mejor ubicación, se determina que se instalarán la unidad del compás satelital a babor de la sonda (instrumento medidor de la profundidad desde la parte más baja del casco) y el CMI compass a estribor de la misma.

En la imagen superior se aprecia el espacio en la parte de estribor de la consola.

Situamos el GPS satelital en la parte izquierda de la sonda



Figura 5.30: Fotografía del GPS satelital, del fabricante JRC.

y en la parte derecha se coloca el CMI.



Figura 5.31: Fotografía del CMI, equipo cedido por el Director de Tesis AitorMartínez.

Para la situación y fijación del CMI hay que realizar una base especial que el autor lo realiza en madera para que la unidad quede visible desde la posición del piloto.



Figura 5.32: Fotografía de la instalación realizada de todo el instrumental a utilizar durante la experiencia.

Se preparó una instalación completa desde el puente magistral hasta la consola de una línea que conectaba la antena satelital con el GPS y una línea que conectara el *fluxgate* de la magnética con el CMI,



Figura 5.33: Fotografía con el cableado de conexión de la antena satelital y el fluxgate para la experiencia.

La colocación de un *fluxgate* adicional en la aguja magnética al que el buque tenía para gobernar automáticamente por medio de la magistral.

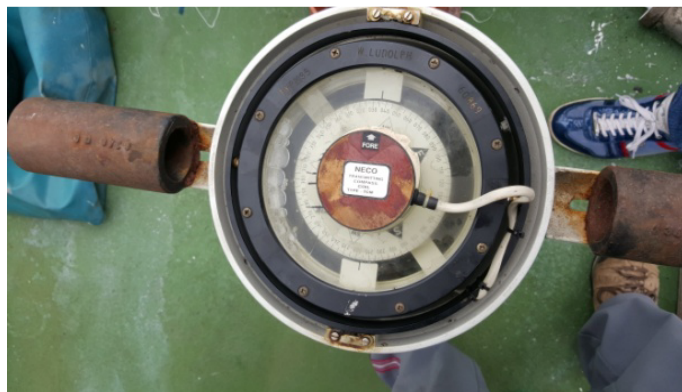


Figura 5.34: Fotografía del fluxgate original situado en la parte superior de la aguja magnética.



Figura 5.35: Fotografía del piloto automático conectado al fluxgate original de la aguja magnética.



Figura 5.36: Fotografía del fluxgate a utilizar en el experimento previa a su instalación.

Adelantamos en este momento que la presente pastilla *flux* se sustituirá por otro digital debido a que se constatará de errores en el funcionamiento del mismo, que nos han generado pérdidas de tiempo hasta darnos cuenta del malfuncionamiento del mismo.

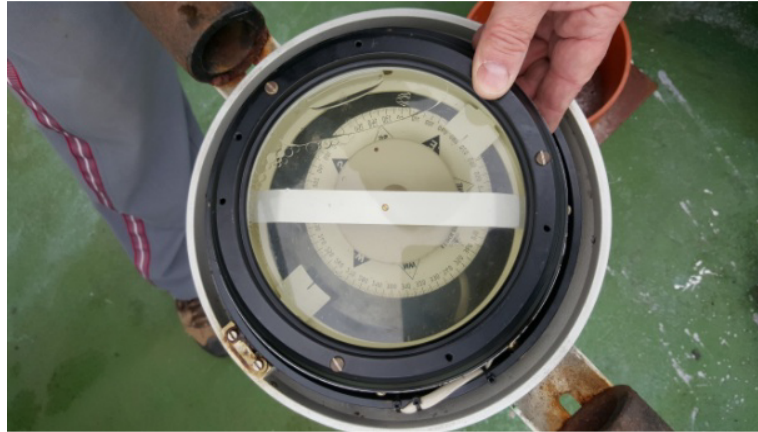


Figura 5.37: Fotografía de la parte inferior de la aguja donde se ubicó el segundo fluxgate.

El autor preparó un pedestal para la ubicación de la antena satelital. Siguiendo para su ubicación, las indicaciones del fabricante, para su instalación, para que fuese suficientemente segura y correcta, dadas las dimensiones de la antena.



Figura 5.38: Fotografía de la colocación de la base de la antena satelital.

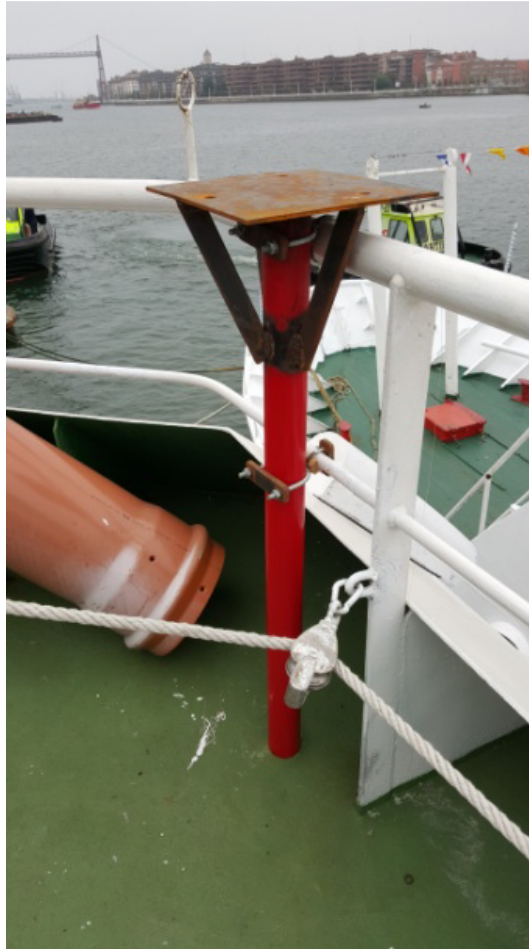


Figura 5.39: Fotografía base para colocación de la antena.

En la imagen siguiente se aprecia el espacio en el que se ubicó la nueva bitácora prototipo utilizada en el experimento, como veremos más adelante.



Figura 5.40: Fotografía del posible emplazamiento de la nueva bitácora experimental.

Se tuvo que construir una nueva base para el asentamiento de la bitácora que se había desmontado del buque anterior "Ortze". No pudiéndose recuperar la base y teniendo que fabricar una nueva.



Figura 5.41: Fotografía de la nueva base de la bitácora colocada en su ubicación. Detrás la bitácora del Villa de Portugaleta con una protección de canvás o lona.

En la siguiente figura se ve la nueva bitácora y la instalación eléctrica para el *fluxgate* nuevo que se ha instalado.



Figura 5.42: Fotografía de la bitácora colocada en su posición.

Después de realizada la instalación del soporte de la antena satelital, la tripulación del “Villa de Portugalete” nos sugirió que la posición de la antena podría verse afectada en su integridad, debido a la cercanía de la antena con la borda y la posibilidad de contacto y posible rotura de manera accidental de la misma, en situaciones de mar gruesa y balances del buque así como de la situación en la que se suelen realizar las operaciones en las cercanías de los finos de popa.

Debido a dicha sugerencia, se procede a reestructurar la base de la antena y elevarla hasta una posición óptima. Hubo que realizar una extensión del mástil debido a que la antena tenía que quedar fuera del ámbito de trabajo de la antena de radar y de su haz de ondas, por lo que se precisaba de una elevación superior a la ofrecida por el mástil original.



Figura 5.43: Fotografía del nuevo pedestal y nueva ubicación de la antena satelital.



Figura 5.44: Fotografía de la ubicación de la antena y de la bitácora desde cubierta principal y desde proa del buque.

Una vez se concluyó la instalación de los sistemas, necesitábamos de la verificación del funcionamiento de los mismos mientras el buque navega.

Se realiza la conexión a un sistema central de suministro de corriente continua, que energice los dos sistemas colocados. Conectando en un interruptor específico de 24 VDC (voltaje al que funcionan los instrumentos).

Se realizó una interconexión entre el GPS y el CMI compass para recibir uno, las señales del otro. Una vez concluida la instalación de todos los equipos procedimos a la comprobación de su funcionamiento.

El día 3 de julio de 2015, se conectó a una fuente de 24 VDC en el cuadro principal y se inicializaron las unidades de la consola. Hay que hacer una mención al *fluxgate* de la aguja magnética que recibe la corriente necesaria de la unidad del CMI compass, con lo que al arrancar dicha unidad el *flux* recibe la corriente necesaria para su funcionamiento.

El CMI compass, funciona de la misma manera que un ordenador, al tratarse de un panel PC, con la ventaja añadida, que no precisa de teclado adjunto, sino que se ha desarrollado con una técnica de *Touch-Screen*.

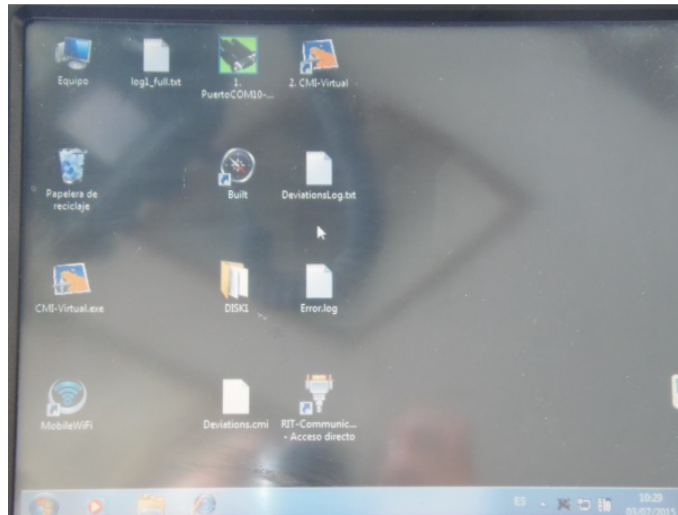


Figura 5.47: Fotografía del panel del CMI.

Para tener todas las posibilidades de control del CMI compass y su funcionamiento compramos un conector tipo telefonía móvil con tarjeta SIM para poder recibir toda la información que se generaran en el CMI cuando el buque estuviera en operaciones, sin la necesidad de tener que estar nosotros presentes a bordo del propio buque. De esta manera con toda la información que recibimos en tierra, poder realizar el posterior análisis de lo registrado durante las distintas navegaciones.

En la figura a continuación se muestra el conector.



Figura 5.48: Fotografía del conector Wi-Fi.

Una vez activado el CMI, hacemos lo propio con el GPS. Después del proceso de comprobaciones de antena y pantalla la unidad quedó lista para su utilización.



Figura 5.49: Fotografía de la unidad de control del GPS de la empresa JRC.

En la pantalla, se ve la configuración seleccionada, de todas las posibles, por ser la que más interesa en el momento. Se visualiza el rumbo verdadero que lleva en el momento del inicio, y otros valores que no interesa comentar en este estudio.

Una vez iniciado el programa del CMI, vemos en la pantalla la configuración estándar con una rosa magnética, en este caso digitalizada, indicándonos el rumbo al que está en ese momento la aguja magnética y para ello el indicativo de la "C" debajo del 053,9.

En la parte derecha de la pantalla vemos tres líneas que nos indican el rumbo magnético, C- 053,9 que es el mismo que el de la rosa, debajo el rumbo verdadero giroscópico, G-???,?, donde los interrogantes nos indican que no recibe señal del girocompás, debido esto a que el "Villa de Portugalete", no dispone del mismo y no poder acoplarse dicho equipo. A continuación, vemos el rumbo satelital, derivado del receptor GPS, que nos indica S 048,6, que es el rumbo que nos da el GPS.

En la siguiente prueba de campo, hemos alineado el rumbo satelital para certificar la correcta alineación de la antena, debido a que en un principio se había alineado aproximadamente.

Debajo de los distintos rumbos, aparece en verde un número $-1,071^\circ$ que corresponde a la declinación magnética calculada por el CMI de acuerdo a la

posición recuperada del GPS, que además aparece detallada justo en la parte inferior del dato de la citada declinación.

En la parte superior izquierda aparecen los coeficientes del desvío ya calculados por el CMI compass.



Figura 5.50: Fotografía de la pantalla del CMI en una de las opciones del mismo.

Hay que recordar que la rosa representada en el centro de la pantalla es una figura activa, que está girando en tiempo real a medida que se navega a los distintos rumbos, y que se puede utilizar, bien como aguja magnética, o bien como rumbo verdadero derivado del GPS.



Figura 5.51: Fotografía de la pantalla del CMI en otra de las opciones del mismo.

En la fotografía anterior, a diferencia de la [Figura 5.50](#), en la parte derecha de la pantalla aparece un cuadro con los rumbos desde 000° hasta 360° de 15° en 15°, y los desvíos calculados para dichos rumbos. Estos datos se han conseguido a medida que se realizaba la navegación, y quedan memorizados hasta que el buque realice nuevos pasos por dichos rumbos y refresque la memoria con nuevos datos.

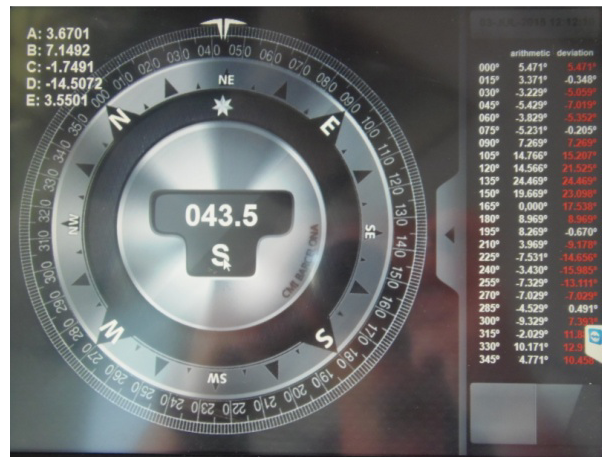


Figura 5.52: Fotografía de la pantalla del CMI. En este caso la rosa central indica que el rumbo que se ve en pantalla es un rumbo verdadero satelital.

Después de la realización de las diferentes pruebas en el “Villa de Portugalete”, se comprueba la afección a la aguja por varias causas externas, que distorsionan la lectura del compás de manera considerable, la no instalación de la misma en crujía (coeficiente A). Verificando cada una de las diferentes causas que aparecen en las lecturas. La proximidad de ciertos instrumentos de navegación, las periferias férricas en las cercanías de la nueva posición de la nueva bitácora, La pluma de labor del bote de rescate de la cubierta magistral, excesivamente próxima al compás y otros temas varios hacen que el funcionamiento de la aguja se vea comprometido.

Para una última comprobación de todo el trabajo algorítmico desarrollado, tomamos la determinación de efectuar con un flux totalmente independiente, e instalado en un lugar “aséptico” magnéticamente hablando, principalmente de aquellos elementos metálicos que inciden en una aguja magnética, para que únicamente se vea afectada por la declinación magnética. Instalándola en campo abierto (propiedad del autor).

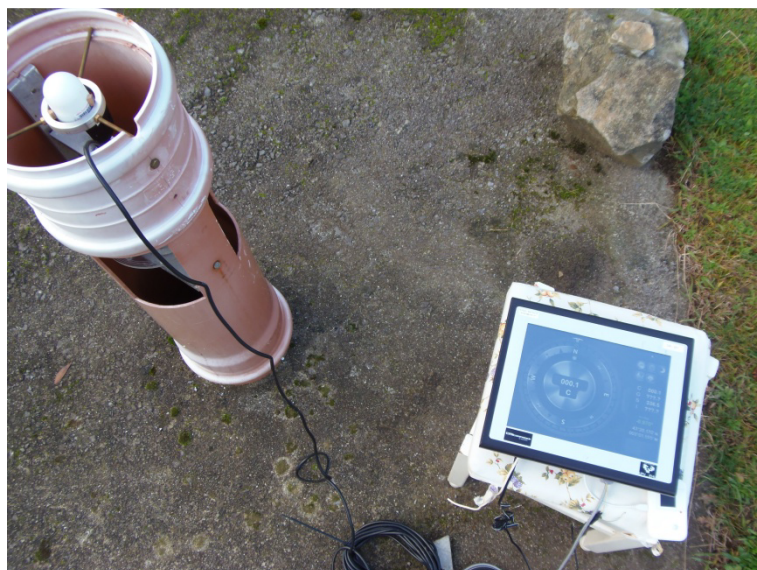


Figura 5.53: Equipo completo montado y en funcionamiento. CMI indicando Rumbo Norte o 000.1°.



Figura 5.54: Equipo completo montado y en funcionamiento. CMI indicando Rumbo Este o 090.0°.



Figura 5.55: Equipo conectado y funcionando. En la parte superior de la pseudo-bitácora se ve al flux digital y en la inferior el plato con los imanes compensadores.

Se coloca el *flux* (utilizándolo como señal única magnética, efectuando las lecturas a través del CMI compass para una mejor visualización y control) centrado en la bitácora, para verificar a distintas distancias el efecto de los correctores sobre el flux, dándonos cuenta de que hay algo erróneo en el sistema.

Después de muchas indagaciones, y comprobar errores continuados en las lecturas, debemos proceder a la sustitución de la pastilla *flux* utilizada inicialmente, debido a algún defecto de funcionamiento. Procedemos a buscar otro medio para poder realizar las lecturas apropiadamente. Sustituimos el defectuoso por otro nuevo electrónico digital con salida NMEA0183 para poder leerlo directamente en el CMI compass.

El nuevo instrumento en cuestión, es el FG1-045 de Red Line Instruments.

Una vez sustituido el antiguo procedemos a realizar las lecturas correspondientes y acto seguido nos damos cuenta de que los resultados aún difieren ostensiblemente, comparando los reales y los teóricos.



Figura 5.56: Flux FG1-045. Fuente: (Red Line Instruments)

Tras otra nueva reflexión, damos con el ajuste a realizar que no era otro que el considerar el valor de la intensidad del campo magnético terrestre 24 miliTeslas sustituyendo el de 50 miliTeslas que se venía a utilizando en los cálculos de aproximación estimados iniciales.

Por fin el día 29 de octubre se realiza un nuevo cálculo y unas nuevas mediciones, obteniendo resultados casi exactos, únicamente desviándose en una o dos décimas de grado, entre los valores reales medidos en el aparato y el estudio teórico. A partir de aquí procedemos a recalcular de manera definitiva, todas las posibles posiciones de los imanes para recopilar así, los nuevos datos y compararlos con los previstos.

Dando así con uno de los objetivos buscados.

5.3.- Métodos Utilizados

5.3.1.- Determinación del momento magnético de un imán corrector

Hasta el presente, siempre se ha tenido conocimiento de la capacidad correctora de los imanes correctores o compensadores por medio de su Potencia Relativa, que los marinos, con posterioridad, utilizamos para la realización del cálculo para corregir los desvíos correspondientes. En relación a la Potencia Relativa de los imanes correctores, éstos se sitúan en un habitáculo o celda numerada en relación al efecto corrector que se intenta generar.

En tiempos actuales, creo que este sistema debería de estar más estudiado, pero a mi pesar el sistema sigue siendo el mismo y no ha habido manera de encontrar algún estudio en que se defina más exactamente la capacidad de los imanes correctores. Con esta premisa inicial, el autor ha pensado que sería correcto investigar más exhaustivamente sobre la capacidad de corrección de los imanes que se van a utilizar en la investigación.

Después de haber indagado en distintos tamaños, formas y materiales utilizados en la confección de imanes correctores, se toma la decisión de utilizar unos estándares que están siendo utilizados en compensaciones de agujas magnéticas. Tiene que reseñar que éstos no limitan ni formas ni tamaños ni materiales para la fabricación de los imanes correctores, y que solo ha sido una elección puntual por poder acceder a estos imanes con mayor facilidad.

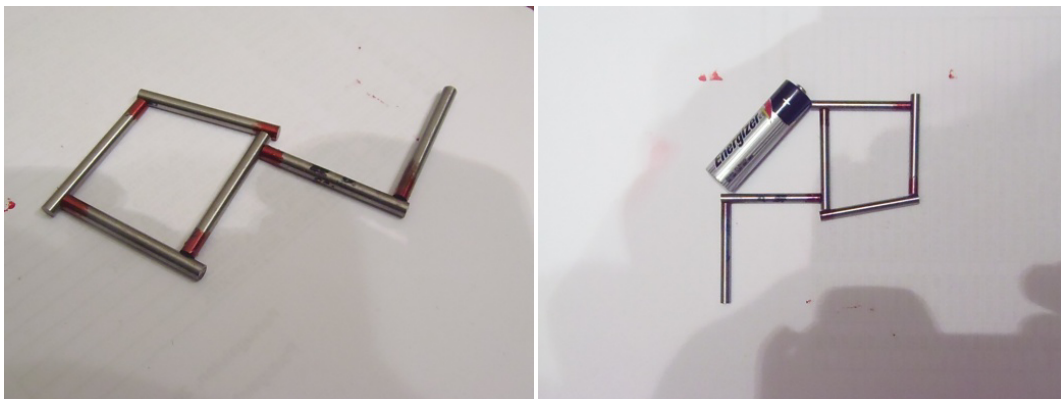


Figura 5.57: Fotografía de los imanes correctores y referencia de su tamaño.

El tipo de imanes que va a utilizar son imanes cilíndricos de un tamaño determinado, y de un material también específico. Los imanes serán cilíndricos de 4 cm de longitud, y de un diámetro de 4 mm. Solicitado al suministrador, del momento magnético de dichos imanes correctores, le informaron que carecían de dicha información, aunque si tenían su remanencia y otros datos, que en principio no tienen gran utilidad en el resultado final de esta investigación.

En vista de éxito obtenido, se impone una determinación del momento magnético generado por cada uno de los imanes correctores que va a utilizar en la investigación. Este desconocimiento le lleva a un nuevo problema de cálculo del momento magnético de dicho imán. Encontrado el sistema, mediante el cual, se puede calcular el momento magnético en función del campo magnético generado por dicho imán, se puede escribir como:

$$m = 5 * B * r^3 * 10^6$$

donde:

m es el momento magnético en Am²

B es el campo medido en T (Teslas)

r distancia de imán a sonda en metros

«Mediante un sencillo procedimiento se puede medir el momento magnético (m) de un imán o un conjunto de imanes, utilizando un magnetómetro de alta sensibilidad. El error del momento (m) calculado puede estar por debajo del $\pm 5\%$. La medición es independiente de la forma y homogeneidad del imán bajo prueba. El "imán bajo prueba" puede ser casi cualquier objeto magnetizado, tal como una máquina, un motor, o aun un satélite, por ejemplo, montados en una mesa rotatoria.»

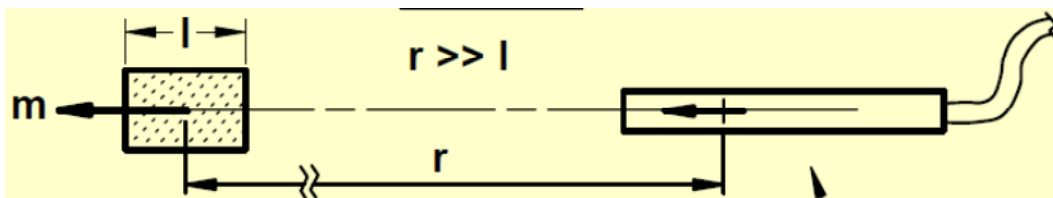


Figura 5.58: Gráfico que representa la posición de imanes y vectores relacionados a cada uno de ellos. Fuente: Serviciencia, S.L. www.serviciencia.es

Se ha realizado la experimentación, con la colaboración de compañeros del Dpto. de Electricidad y Electrónica, especializados en este campo, y obteniendo los siguientes resultados:

Se ha colocado un imán en el centro de un goniómetro (aparato construido con materiales no magnéticos, y que consta de una superficie lisa sobre la cual colocamos el imán y pudiéndosele hacer girar sobre su centro, de forma precisa como se indica en la [Figura 5.59](#)). El goniómetro tiene una resolución angular de 1° .



Figura 5.59: Fotografía representando la fijación de un imán corrector, que el autor utilizará en la experiencia, en el goniómetro de medición.

El campo producido por el imán se midió con un magnetómetro, *fluxgate*. El centro del goniómetro y el punto de medida del *fluxgate* se encuentran separados por una distancia r . Han realizado una serie de medidas diferentes a tres distancias diferentes de $r = 164$ mm, $r = 244$ mm y $r = 325$ mm.

Aunque inicialmente se había previsto anular el campo magnético ambiente (principalmente el terrestre, pero también cualquier otro campo presente en el laboratorio) utilizando un sistema *triaxial* de carretes de Helmholtz, se ha decidido finalmente que esto no era necesario. El campo magnético ambiente se considera constante y la información relevante, de la que se obtiene el momento magnético, proviene de las variaciones medidas al hacer girar el imán. Por lo tanto, aunque en la figura aparece el sistema de carretes *triaxial*, éste no se ha utilizado. Solo es relevante el sensor *fluxgate* que se encuentra situado en el centro de *triaxial*.

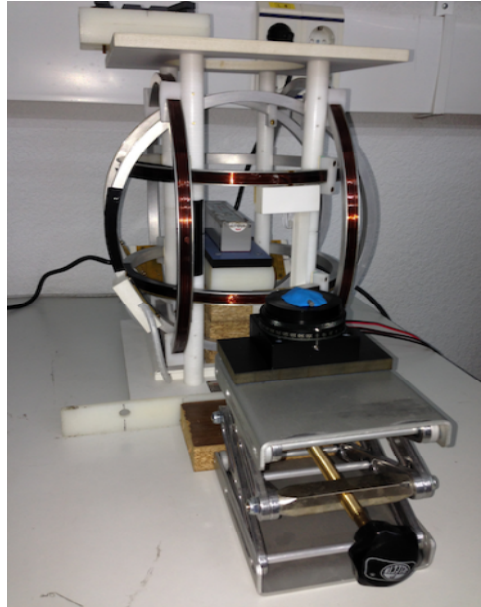


Figura 5.60: Fotografía representando la medición, donde se aprecian el fluxgate dentro de las bobinas de Helmholtz y el imán sobre el goniómetro frente al fluxgate.

Los componentes del campo magnético B creado por un momento magnético m , en coordenadas polares, en un punto cualquiera (r, θ) son:

$$B_r = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} 2 \cos \theta$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} \sin \theta$$

En la configuración del experimento Figura 5.58 , éstas son las componentes de B que mide para cada ángulo, el *fluxgate* en sus ejes x e y (salvo signos).

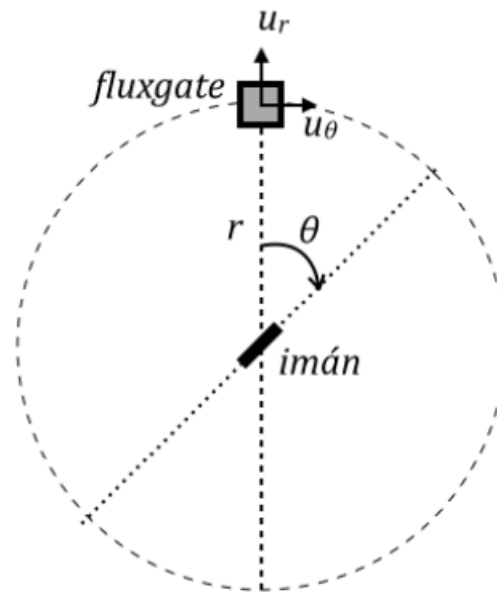


Figura 5.61: Gráfico que representa los componentes del campo magnético “B” creado por un momento magnético m , en coordenadas polares, en un punto cualquiera (r, θ) .

Todas las mediciones realizadas, se trasvasan a un programa realizado para tal fin, con la funcionalidad de generar unas curvas de los diferentes valores capturados, y de esta manera obtener los resultados a la primera distancia estipulada. Los resultados son los mostrados en las [Figura 5.62](#), [Figura 5.63](#), y [Figura 5.64](#). Se ha restado la contribución constante en ambas componentes. Se presentan de esta manera los datos adquiridos de la medición con diferentes símbolos, y el ajuste a las funciones de seno y coseno en líneas discontinuas.

La primera medición se ha realizado a una distancia $r = 164\text{mm}$ entre el *fluxgate* y el imán a medir.

Las amplitudes de los componentes del campo no son exactamente el doble una de la otra, como deberían ser de acuerdo con las ecuaciones anteriores.

Calculando m con ambas expresiones, el valor medio que se obtiene es $m = 0,44 \text{ Am}^2$.

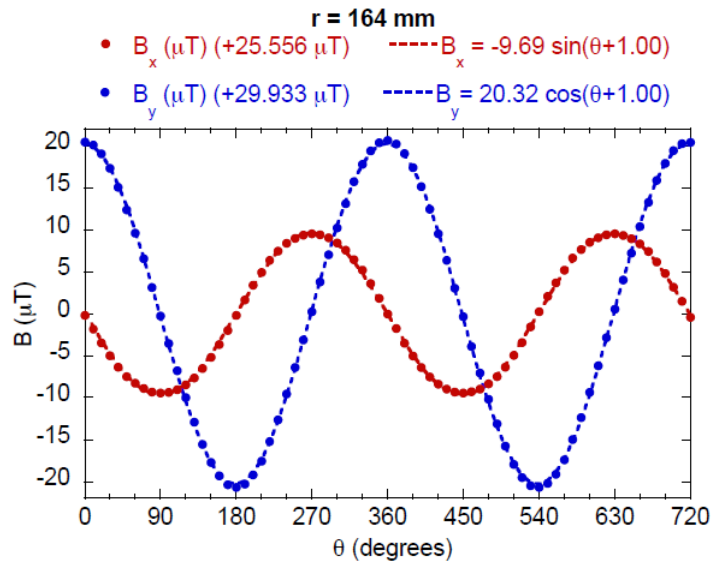


Figura 5.62: Gráfico que representa el valor de “m” en distintas posiciones de medición, a una distancia de 164 mm entre el fluxgate y el imán.

Para la segunda medición lo hacemos de la misma manera, con la salvedad que el soporte con el goniómetro y el imán se colocan a una distancia mayor, como ya hemos especificado más arriba de 244 mm entre el *fluxgate* y el imán, con lo que vemos que la situación mejora con respecto a la anterior.

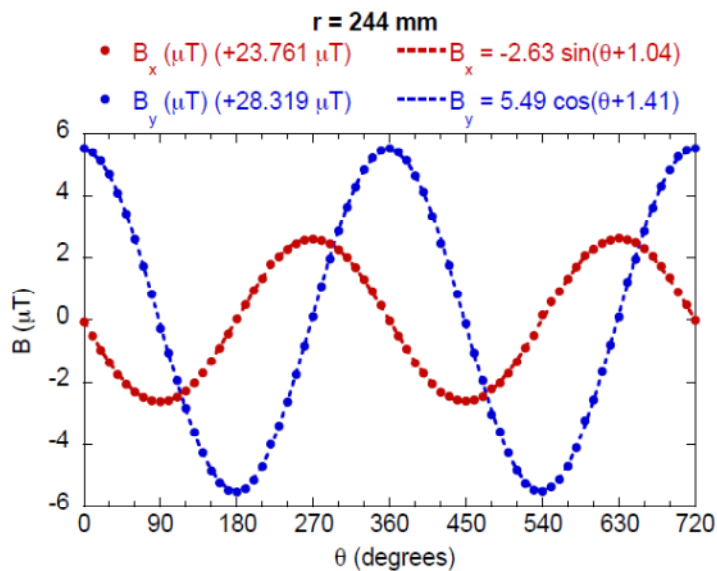


Figura 5.63: Gráfico que representa el valor de “m” en distintas posiciones de medición, a una distancia de 244 mm entre el fluxgate y el imán.

Resumiendo de nuevo la gráfica, al igual que hemos realizado en el gráfico anterior, obtenemos un valor medio para m según las fórmulas anteriores de $m = 0,39 \text{ Am}^2$.

Realizamos una tercera medición a una nueva distancia de $r = 325 \text{ mm}$ para definir más exactamente el momento magnético del imán.

El resultado obtenido, se ve que es sensiblemente mejor que los anteriores, pero la variación en la distancia no ha mejorado ostensiblemente la medición anterior, por lo tanto creemos que afinar más en distancia, no va a resultar una mejora más significativa.

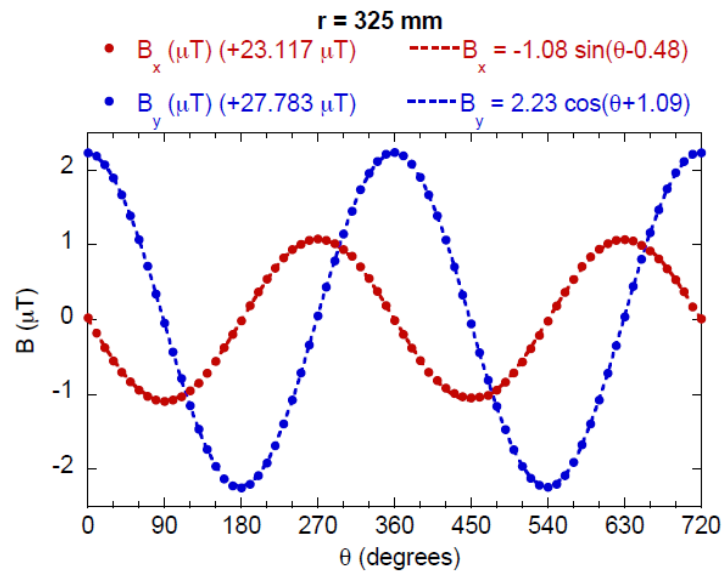


Figura 5.64: Gráfico que representa el valor de " m " en distintas posiciones de medición, a una distancia de 325 mm entre el fluxgate y el imán.

Por lo tanto al final de esta tercera medición, vemos que el valor medio obtenido para dicha medición es de un momento magnético $m = 0,38 \text{ Am}^2$.

A partir de ahora y para los sucesivos cálculos utilizaremos este momento magnético, y con él definir el efecto de los imanes en la corrección de los desvíos de la aguja magnética a los diferentes rumbos necesarios para su compensación.

5.3.2.- Desarrollo de la aplicación matemática

Una vez conocido el momento magnético de un imán que se utilizará para la compensación, se procede a perfilar la ecuación matemática que va a servir para realizar el cálculo del campo magnético del conjunto de los imanes que utilizaremos para la compensación de la aguja magnética.

La elección de la fórmula que el autor va a utilizar, se debe a que la principal hipótesis que se enuncia, es la de que a la distancia a la que calculamos el campo, los imanes pueden considerarse como un dipolo puntual. La fórmula general la obtenemos del REITZ-MILFORD 8-79 [102]. Esta es la ecuación que da el campo generado por un dipolo. Es la expresión más general, escrita en forma vectorial. Se podría expresar en coordenadas, por ejemplo, polares o cartesianas, que dan lugar a otras fórmulas, pero todas son la misma en esencia. Por lo tanto vamos a utilizar esta ecuación en forma vectorial, que calcula el campo generado por un dipolo.

\hat{i} , \hat{j} y \hat{k} son los vectores unitarios en las tres direcciones x , y y z (figura 8)

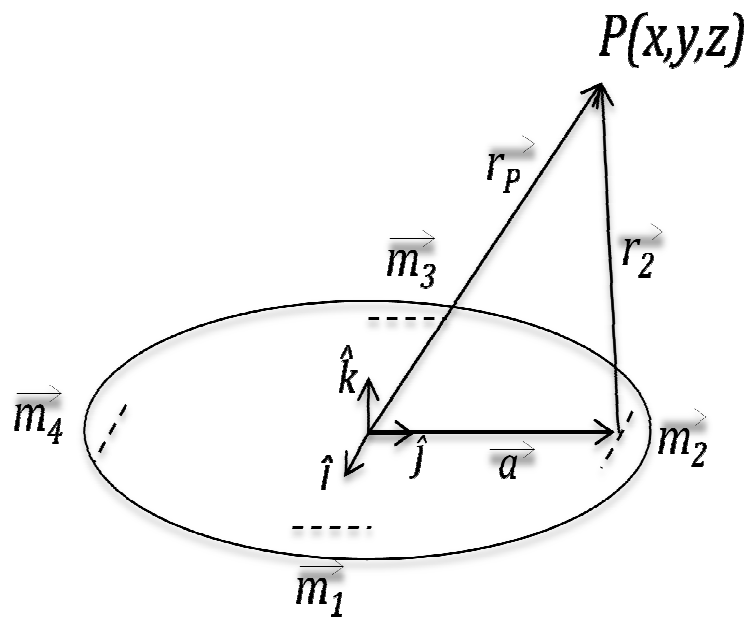


Figura 5.65: Gráfico que representa la posición de los imanes y los vectores relacionados a cada uno de ellos.

Se desarrolla la fórmula completa ordenadamente.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[-\frac{\vec{m}}{r^3} + \frac{3(\vec{m} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} \right] \quad (1)$$

El vector \vec{r} es el que va desde la posición del dipolo (momento magnético) \vec{m} hasta el punto donde calculamos el campo.

Tenemos 4 dipolos \vec{m}_1 , \vec{m}_2 , \vec{m}_3 y \vec{m}_4 . El campo total \vec{B} en cualquier punto P es la suma de los campos creados por cada dipolo, por lo que:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \vec{B}_4 \quad (2)$$

Cada uno de los campos anteriores se calcula con la fórmula general (1)

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[-\frac{\vec{m}_1}{r_1^3} + \frac{3(\vec{m}_1 \cdot \vec{r}_1)\vec{r}_1}{r_1^5} \right] \quad (3)$$

$$\vec{B}_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[-\frac{\vec{m}_2}{r_2^3} + \frac{3(\vec{m}_2 \cdot \vec{r}_2)\vec{r}_2}{r_2^5} \right] \quad (4)$$

$$\vec{B}_3 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[-\frac{\vec{m}_3}{r_3^3} + \frac{3(\vec{m}_3 \cdot \vec{r}_3)\vec{r}_3}{r_3^5} \right] \quad (5)$$

$$\vec{B}_4 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[-\frac{\vec{m}_4}{r_4^3} + \frac{3(\vec{m}_4 \cdot \vec{r}_4)\vec{r}_4}{r_4^5} \right] \quad (6)$$

\vec{r}_i es el vector que va desde un dipolo cualquiera hasta el punto P donde se calcula el campo.

Como vemos en la [Figura 5.65](#), ponemos el origen de coordenadas en el centro de la base donde se situaran los 4 dipolos. La posición de los dipolos está definida por los vectores:

$$\vec{a}_1 = a\hat{i} \quad (7)$$

$$\vec{a}_2 = a\hat{j} \quad (8)$$

$$\vec{a}_3 = -a\hat{i} \quad (9)$$

$$\vec{a}_4 = -a\hat{j} \quad (10)$$

El punto P , con coordenadas (x, y, z) , en el punto donde queremos calcular el campo, tiene un vector de posicionamiento genérico:

$$\vec{r}_p = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} \quad (11)$$

Por lo tanto el vector \vec{r}_i que aparece en la ecuación (3) viene de:

$$\vec{r}_p = \vec{a}_i + \vec{r}_i \quad (12)$$

donde:

$$\vec{r}_i = \vec{r}_p - \vec{a}_i \quad (13)$$

donde $i = (1, 2, 3 \text{ y } 4)$

si sumamos (7) y (11) tenemos:

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_p - \vec{a}_1 = (x - a)\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} \quad (14)$$

si sumamos (8) y (11) tenemos:

$$\vec{r}_2 = \vec{r}_p - \vec{a}_2 = x\hat{i} + (y - a)\hat{j} + z\hat{k} \quad (15)$$

si sumamos (9) y (11) tenemos:

$$\vec{r}_3 = \vec{r}_p - \vec{a}_3 = (x + a)\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} \quad (16)$$

Si sumamos (10) y (11) tenemos:

$$\vec{r}_4 = \vec{r}_p - \vec{a}_4 = x\hat{i} + (y + a)\hat{j} + z\hat{k} \quad (17)$$

De la ecuación (14) se saca el módulo de \vec{r}_1 que es:

$$r_1 = [(x - a)^2 + y^2 + z^2]^{1/2} \quad (18)$$

De la ecuación (15) se saca el módulo de \vec{r}_2 que es:

$$r_2 = [x^2 + (y - a)^2 + z^2]^{1/2} \quad (19)$$

De la ecuación (16) se saca el módulo de \vec{r}_3 que es:

$$r_3 = [(x + a)^2 + y^2 + z^2]^{1/2} \quad (20)$$

De la ecuación (17) se saca el módulo de \vec{r}_4 que es:

$$r_4 = [x^2 + (y + a)^2 + z^2]^{1/2} \quad (21)$$

Los denominadores que hay que poner en las fórmulas (3), (4), (5) y (6) son, a partir de los módulos correspondientes:

$$r_1^3 = [(x - a)^2 + y^2 + z^2]^{3/2} \quad (22)$$

$$r_1^5 = [(x - a)^2 + y^2 + z^2]^{5/2} \quad (23)$$

$$r_2^3 = [x^2 + (y - a)^2 + z^2]^{3/2} \quad (24)$$

$$r_2^5 = [x^2 + (y - a)^2 + z^2]^{5/2} \quad (25)$$

$$r_3^3 = [(x + a)^2 + y^2 + z^2]^{3/2} \quad (26)$$

$$r_3^5 = [(x + a)^2 + y^2 + z^2]^{5/2} \quad (27)$$

$$r_4^3 = [x^2 + (y + a)^2 + z^2]^{3/2} \quad (28)$$

$$r_4^5 = [x^2 + (y + a)^2 + z^2]^{5/2} \quad (29)$$

Al tener los dipolos el giro solo en el plano horizontal, vamos a definir los ángulos del dipolo en relación a su posición de reposo o inicial de los mismos.

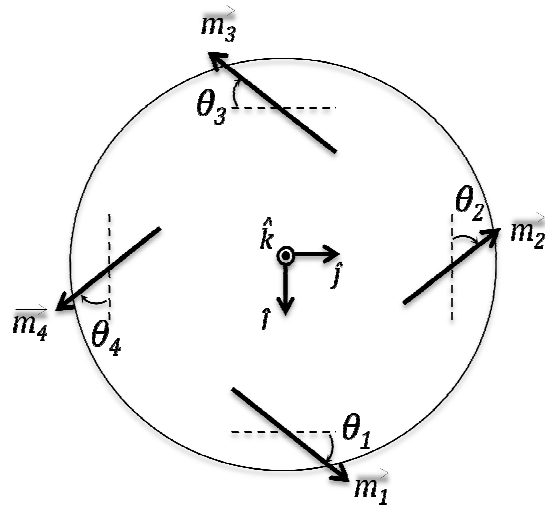


Figura 5.66: Gráfico representando los imanes en forma de vectores.

Los vectores momento magnético de los 4 dipolos son:

$$\vec{m}_1 = m(\sin \vartheta_1 \hat{i} + \cos \vartheta_1 \hat{j}) \quad (30)$$

$$\vec{m}_2 = m(-\cos \vartheta_2 \hat{i} + \sin \vartheta_2 \hat{j}) \quad (31)$$

$$\vec{m}_3 = m(-\sin \vartheta_3 \hat{i} - \cos \vartheta_3 \hat{j}) = -m(\sin \vartheta_3 \hat{i} + \cos \vartheta_3 \hat{j}) \quad (32)$$

$$\vec{m}_4 = m(\cos \vartheta_4 \hat{i} - \sin \vartheta_4 \hat{j}) \quad (33)$$

Una vez obtenidas estas fórmulas necesarias, vamos estructurando las diferentes partes de la fórmula general para los diferentes dipolos, con lo que tenemos en el segundo sumando $\vec{m}_1 \cdot \vec{r}_1$ (30) y (14) donde:

$$\begin{aligned}\vec{m}_1 \cdot \vec{r}_1 &= m(\sin \vartheta_1 \hat{i} + \cos \vartheta_1 \hat{j}) \cdot [(x - a)\hat{i} + y\hat{j}] = \\ &= m(x - a) \sin \vartheta_1 + my \cos \vartheta_1\end{aligned}\quad (34)$$

El segundo sumando $\vec{m}_2 \cdot \vec{r}_2$ (31) y (15) donde:

$$\begin{aligned}\vec{m}_2 \cdot \vec{r}_2 &= m(-\cos \vartheta_2 \hat{i} + \sin \vartheta_2 \hat{j}) \cdot [x\hat{i} + (y - a)\hat{j}] = \\ &= -mx \cos \vartheta_2 + m(y - a) \sin \vartheta_2\end{aligned}\quad (35)$$

El segundo sumando $\vec{m}_3 \cdot \vec{r}_3$ (32) y (16) donde:

$$\begin{aligned}\vec{m}_3 \cdot \vec{r}_3 &= -m(\sin \vartheta_3 \hat{i} + \cos \vartheta_3 \hat{j}) \cdot [(x + a)\hat{i} + y\hat{j}] = \\ &= -m(x + a) \sin \vartheta_3 - my \cos \vartheta_3\end{aligned}\quad (36)$$

El segundo sumando $\vec{m}_4 \cdot \vec{r}_4$ (33) y (17) donde:

$$\begin{aligned}\vec{m}_4 \cdot \vec{r}_4 &= m(\cos \vartheta_4 \hat{i} - \sin \vartheta_4 \hat{j}) \cdot [x\hat{i} + (y + a)\hat{j}] = \\ &= mx \cos \vartheta_4 - m(y + a) \sin \vartheta_4\end{aligned}\quad (37)$$

Recopilando todos los términos de la fórmula general (3) nos quedaría que \vec{B}_1 es un vector dado por (14), (22), (23), (30) y (35):

$$\begin{aligned}\vec{B}_1 &= \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ -\frac{m \sin \vartheta_1}{r_1^3} + \frac{3[m(x - a) \sin \vartheta_1 + my \cos \vartheta_1](x - a)}{r_1^5} \right\} \hat{i} + \\ &+ \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ -\frac{m \cos \vartheta_1}{r_1^3} + \frac{3[m(x - a) \sin \vartheta_1 + my \cos \vartheta_1]y}{r_1^5} \right\} \hat{j} +\end{aligned}\quad (38)$$

$$+ \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{3[m(x-a)\sin\vartheta_1 + my\cos\vartheta_1]z}{r_1^5} \right\} \hat{k}$$

Vamos sustituyendo los valores de igual manera en \vec{B}_2 (15), (24), (25), (31) y (37), \vec{B}_3 (16), (26), (27), (32) y (39) y \vec{B}_4 (17), (28), (29), (33) y (41).

$$\begin{aligned} \vec{B}_2 = & \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{m\cos\vartheta_2}{r_2^3} + \frac{3[-mx\cos\vartheta_2 + m(y-a)\sin\vartheta_2]x}{r_2^5} \right\} \hat{i} + \\ & + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ -\frac{m\sin\vartheta_2}{r_2^3} + \frac{3[-mx\cos\vartheta_2 + m(y-a)\sin\vartheta_2](y-a)}{r_2^5} \right\} \hat{j} + \\ & + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{3[-mx\cos\vartheta_2 + m(y-a)\sin\vartheta_2]z}{r_2^5} \right\} \hat{k} \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \vec{B}_3 = & \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{m\sin\vartheta_3}{r_3^3} + \frac{3[-m(x+a)\sin\vartheta_3 - my\cos\vartheta_3](x+a)}{r_3^5} \right\} \hat{i} + \\ & + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ -\frac{m\cos\vartheta_3}{r_3^3} + \frac{3[-m(x+a)\sin\vartheta_3 - my\cos\vartheta_3]y}{r_3^5} \right\} \hat{j} + \\ & + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{3[-m(x+a)\sin\vartheta_3 - my\cos\vartheta_3]z}{r_3^5} \right\} \hat{k} \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \vec{B}_4 = & \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ -\frac{m\cos\vartheta_4}{r_4^3} + \frac{3[mx\cos\vartheta_4 - m(y+a)\sin\vartheta_4]x}{r_4^5} \right\} \hat{i} + \\ & + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{m\sin\vartheta_4}{r_4^3} + \frac{3[mx\cos\vartheta_4 - m(y+a)\sin\vartheta_4](y+a)}{r_4^5} \right\} \hat{j} + \\ & + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{3[mx\cos\vartheta_4 - m(y+a)\sin\vartheta_4]z}{r_4^5} \right\} \hat{k} \end{aligned} \quad (41)$$

Y si sustituimos los denominadores por sus valores correspondientes, nos queda:

$$\begin{aligned}
 \vec{B}_1 = & \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{-m \sin \vartheta_1}{[(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[m(x-a) \sin \vartheta_1 + my \cos \vartheta_1](x-a)}{[(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{i} + \\
 & + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{-m \cos \vartheta_1}{[(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[m(x-a) \sin \vartheta_1 + my \cos \vartheta_1]y}{[(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{j} + \\
 & + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{3[m(x-a) \sin \vartheta_1 + my \cos \vartheta_1]z}{[(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{k}
 \end{aligned} \tag{42}$$

$$\begin{aligned}
 \vec{B}_2 = & \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{m \cos \vartheta_2}{[x^2 + (y-a)^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[-mx \cos \vartheta_2 + m(y-a) \sin \vartheta_2]x}{[x^2 + (y-a)^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{i} + \\
 & + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{-m \sin \vartheta_2}{[x^2 + (y-a)^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[mx \cos \vartheta_2 + m(y-a) \sin \vartheta_2](y-a)}{[x^2 + (y-a)^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{j} + \\
 & + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{3[mx \cos \vartheta_2 + m(y-a) \sin \vartheta_2]z}{[x^2 + (y-a)^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{k}
 \end{aligned} \tag{43}$$

$$\begin{aligned}
 \vec{B}_3 = & \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{m \sin \vartheta_3}{[(x+a)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[-m(x+a) \sin \vartheta_3 - my \cos \vartheta_3](x+a)}{[(x+a)^2 + y^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{i} + \\
 & + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{-m \cos \vartheta_3}{[(x+a)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[-m(x+a) \sin \vartheta_3 - my \cos \vartheta_3]y}{[(x+a)^2 + y^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{j} + \\
 & + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{3[-m(x+a) \sin \vartheta_3 - my \cos \vartheta_3]z}{[(x+a)^2 + y^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{k}
 \end{aligned} \tag{44}$$

$$\begin{aligned}
 \vec{B}_4 = & \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{-m \cos \vartheta_4}{[x^2 + (y+a)^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[mx \cos \vartheta_4 - m(y+a) \sin \vartheta_4]x}{[x^2 + (y+a)^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{i} + \\
 & + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{m \sin \vartheta_4}{[x^2 + (y+a)^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[mx \cos \vartheta_4 - m(y+a) \sin \vartheta_4](y+a)}{[x^2 + (y+a)^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{j} + \\
 & + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{3[mx \cos \vartheta_4 - m(y+a) \sin \vartheta_4]z}{[x^2 + (y+a)^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{k}
 \end{aligned} \tag{45}$$

$$+ \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{3[mx \cos \vartheta_4 - m(y+a) \sin \vartheta_4]z}{[x^2 + (y+a)^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{k}$$

Finalmente, si calculamos \vec{B} , campo magnético total en función de la fórmula (2) tendremos la ecuación final del campo total creado por 4 dipolos:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \vec{B}_4 =$$

$$\vec{B}_{iman 1} = \vec{B}_1 = B_{1x}\hat{i} + B_{1y}\hat{j} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \vec{B}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{-m \sin \vartheta_1}{[(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[m(x-a) \sin \vartheta_1 + my \cos \vartheta_1](x-a)}{[(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{i} + \\ + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{-m \cos \vartheta_1}{[(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[m(x-a) \sin \vartheta_1 + my \cos \vartheta_1]y}{[(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{j} \end{aligned} \quad (47)$$

$$\vec{B}_{iman 2} = \vec{B}_2 = B_{2x}\hat{i} + B_{2y}\hat{j} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \vec{B}_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{m \cos \vartheta_2}{[x^2 + (y-a)^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[-mx \cos \vartheta_2 + m(y-a) \sin \vartheta_2]x}{[x^2 + (y-a)^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{i} + \\ + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{-m \sin \vartheta_2}{[x^2 + (y-a)^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[mx \cos \vartheta_2 + m(y-a) \sin \vartheta_2](y-a)}{[x^2 + (y-a)^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{j} \end{aligned} \quad (49)$$

$$\vec{B}_{iman\ 3} = \vec{B}_3 = B_{3x}\hat{i} + B_{3y}\hat{j} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} \vec{B}_3 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{m \sin \vartheta_3}{[(x+a)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[-m(x+a) \sin \vartheta_3 - my \cos \vartheta_3](x+a)}{[(x+a)^2 + y^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{i} + \\ + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{-m \cos \vartheta_3}{[(x+a)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[-m(x+a) \sin \vartheta_3 - my \cos \vartheta_3]y}{[(x+a)^2 + y^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{j} \end{aligned} \quad (51)$$

$$\vec{B}_{iman\ 4} = \vec{B}_4 = B_{4x}\hat{i} + B_{4y}\hat{j} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \vec{B}_4 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{-m \cos \vartheta_4}{[x^2 + (y+a)^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[mx \cos \vartheta_4 - m(y+a) \sin \vartheta_4]x}{[x^2 + (y+a)^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{i} + \\ + \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{m \sin \vartheta_4}{[x^2 + (y+a)^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{3[mx \cos \vartheta_4 - m(y+a) \sin \vartheta_4](y+a)}{[x^2 + (y+a)^2 + z^2]^{5/2}} \right\} \hat{j} \end{aligned} \quad (53)$$

Una vez calculado el campo magnético generado por los imanes correctores, le aplicaremos el campo magnético terrestre existente en el lugar en el que se realiza el estudio.

El campo magnético terrestre lo calculamos por medio de un calculador existente en la red perteneciente a la NOAA mediante el cual, especificando las coordenadas del lugar del cálculo, nos calcula la intensidad del campo magnético terrestre.¹⁶

De todos los datos obtenidos por dicho sistema, solo nos interesa el campo horizontal terrestre. Se adjunta la captura de dicha página de cálculo. En nuestro

¹⁶ <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm>

caso la intensidad del campo magnético horizontal terrestre en el lugar de referencia es de 24 μT (miliTeslas).

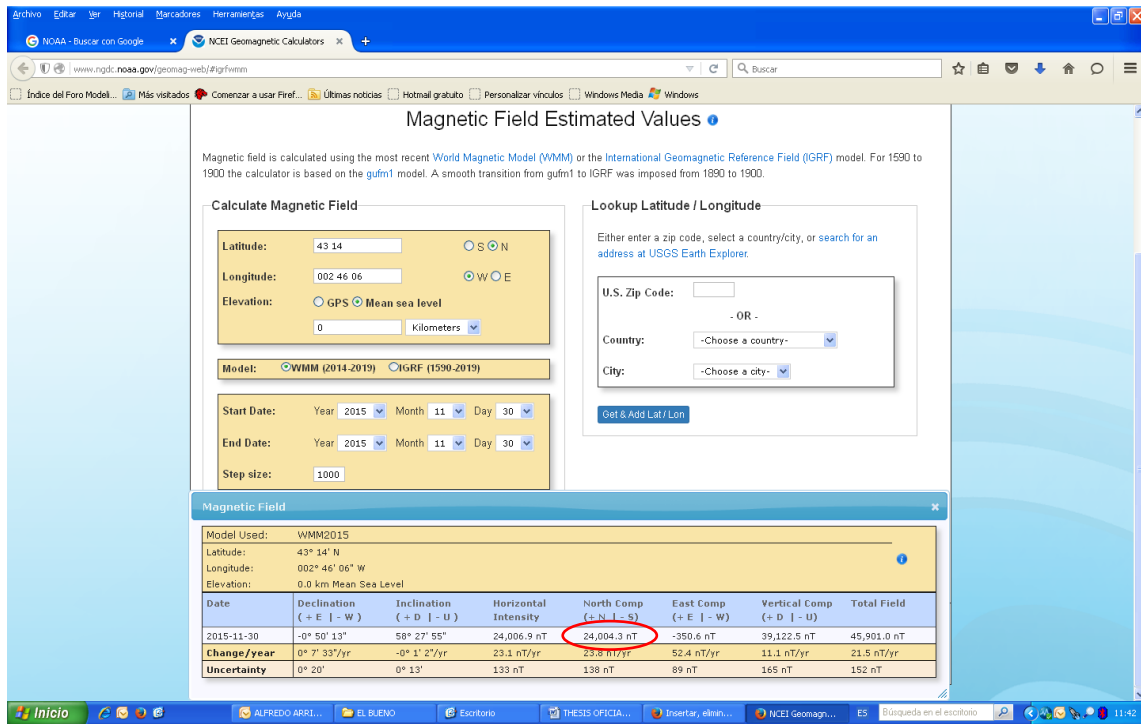


Figura 5.67: Página para el cálculo de la componente horizontal terrestre.

Fuente NOAA.

Por lo tanto retomando el cálculo, lo vamos a hacer de forma vectorial, debido a que de lo contrario tendríamos que generar una fórmula impresionante:

$$\vec{B}_{imanes} = \vec{B}_i = B_{ix}\hat{i} + B_{iy}\hat{j} \quad (54)$$

$$\vec{B}_{tierra} = \vec{B}_t = B_{tx}\hat{i} + B_{ty}\hat{j} \quad (55)$$

$$\vec{B}_{Total} = \vec{B}_T = (B_{ix} + B_{tx})\hat{i} + (B_{iy} + B_{ty})\hat{j} \quad (56)$$

$$\theta = \arctan \frac{(B_{i_y} + B_{t_y})}{(B_{i_x} + B_{t_x})} \quad (57)$$

donde:

$$\vec{B}_{t_x} = -24 \mu\text{T} \hat{i} \quad (58)$$

y

$$\vec{B}_{t_y} = -24 \mu\text{T} \hat{j} \quad (59)$$

La hipótesis principal, era que la aguja se mueve horizontalmente es decir gira horizontalmente por lo tanto, solo vamos a tener en cuenta el campo horizontal. La componente vertical la soporta el estilo e impide que la aguja se mueva verticalmente.

La aguja siempre se coloca en la dirección del campo magnético total (suma del terrestre y del que hacen los imanes correctores) (52).

La fórmula computa el campo de los imanes correctores. Al resultado se le suma el magnético terrestre. La suma se hace vectorialmente en el plano, cada uno con sus componentes, y luego se calcula el ángulo con las componentes del campo total (53).

Si nos fijamos en la [Figura 5.66](#), el campo terrestre será $\vec{B} = 24 \hat{i}$ si apunta en dirección (x), será $\vec{B} = -24 \hat{i}$ si apunta en dirección (-x). Será $\vec{B} = 24 \hat{j}$ si apunta en dirección (y) y $\vec{B} = -24 \hat{j}$ si apunta en dirección (-y).

La dirección del campo terrestre viene indicada en cada gráfico de estudio.

En la fórmula de cada uno de los imanes, se ponen los valores de z para cada cálculo, es decir la distancia. Los valores de x e y son cero por estar el punto de cálculo en el eje del plato.

Para cada valor de z (distancia del plato a la aguja magnética) calculamos los campos de todos los imanes correctores B_1 , B_2 , B_3 y B_4 . Sumamos todos los campos componente a componente. Al final se le suma el campo terrestre en el sentido en

que muestre el Norte, el campo terrestre, como se ha comentado anteriormente. Si el campo terrestre está indicado hacia arriba de la página es decir en dirección $(-x)$ el valor del magnetismo terrestre será de -24 y se restará de la parte i de la fórmula del imán 2 y del imán 4 por estar estos imanes alineados con el campo terrestre. Los imanes 1 y 3 no tendrán ninguna adición por estar en dirección perpendicular a la del campo magnético terrestre. La parte j es la suma de solo sus componentes sin incidencia del campo terrestre. En la parte (z) de la fórmula se calcula pero solo incide en un mayor o menor empuje sobre el estilo de la aguja magnética.

Si la dirección del campo terrestre estuviera en la dirección hacia la izquierda, el campo generado sería $-j$ y entonces se restaría de la parte j de los imanes 1 y 3 que estarían en ese momento alineados con el campo magnético terrestre.

Para resumir diremos que para cada distancia z que definamos, desde la posición del plato hasta la aguja magnética, calculamos los campos magnéticos que generan los cuatro imanes. La suma se realiza componente a componente por lo que el resultado final de la suma será en términos de dos componentes, en i y en j . A este resultado completo de los cuatro campos se le sumará 24 si el campo es en dirección (x) y se le sumará al término en i . Por el contrario si el valor del campo es en dirección $(-x)$ se le restará al término en i .

Si el valor del campo es en dirección (y) se le sumará el valor 24 al componente en j . Por el contrario si el valor del campo es en dirección $(-y)$ se restará el valor de 24 al término en j del resultado final. En realidad no miramos si los imanes están o no alineados con el campo terrestre, si no producen campo no afectará a la suma.

Al final obtenemos el valor del campo total en función de los componentes de i y de j para una determinada distancia z .

Para realizar el cálculo del ángulo que corrige a esa distancia se calcula mediante la fórmula (53).

Toda esta última parte se realiza mediante la formulación escrita en Matlab. Los resultados se muestran en diferentes gráficas tanto en función del campo magnético generado como en función del ángulo de corrección producido.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar para la clarificación de las descripciones que vamos a realizar definimos como dirección del magnetismo terrestre la flecha roja que va a aparecer en los gráficos adjuntos. Vamos a definir situaciones que van a estar relacionados con las orientaciones Este y Oeste de los imanes que van a estar actuando sobre la aguja magnética en cada momento. Añadiendo a lo anterior diremos que cada situación nos va a generar dos condiciones particulares que van a estar relacionadas con las orientaciones Norte y Sur de los imanes que en un determinado momento no van a estar actuando sobre la aguja magnética.

En la primera situación que nos ocupa, la dirección Norte coincide con la dirección de la misma proa del buque, es decir hacia la parte superior de la página. Una vez definido esto, ponemos en posición cero todos los ángulos de los diferentes imanes correctores, es decir, el ángulo del imán 1 se colocará hacia el Este, o lo que es lo mismo hacia la derecha de la página, el imán 2 se colocará hacia el Norte, es decir en la misma dirección que el campo magnético terrestre que hemos comentado e indicará hacia la parte superior de la página, el imán 3 lo colocaremos hacia el Oeste, es decir hacia la parte izquierda de la página, y finalmente el imán 4 y último, lo colocaremos en dirección Sur o lo que es lo mismo hacia la parte inferior de esta página.

Sirva este detalle anterior para aclarar en adelante las posiciones y direcciones de los distintos imanes correctores y de las distintas posiciones del campo magnético terrestre

Especial 0. Se le denomina de esta manera por indicarlo siendo su posicionamiento de cero inicial. Una vez colocados en la situación inicial, ponemos los ángulos de cada imán tal y como lo hemos comentado en los párrafos anteriores, con lo que el valor de dicho ángulo perteneciente a cada imán es cero. Dichos valores los insertamos en el programa del ordenador que nos da un resultado de cero. Esto significa que en la posición angular de cero de los cuatro imanes quedan anulados por el efecto de los opuestos, siendo cero, el efecto corrector de los mismos. La figura correspondería a la [Figura 5.66](#) donde θ_1 , θ_2 , θ_3 y θ_4 son iguales a cero.

Estudiaremos las siguientes situaciones especiales con solo una pareja de imanes, para luego poder compararlos con las situaciones con las otras compuestas de cuatro imanes. Con estos primeros obtendremos las variantes que se consiguen con una combinación de una pareja entre sí.

Denominaremos casos especiales o especiales a secas En la **Especial 1** imanes al Oeste, condición 1 imanes Norte-Sur anulados entre sí. Los imanes al Oeste, 1 y 3 son los imanes activos que son los que repercuten en la acción correctora de la aguja magnética. En adelante denominaremos a estos imanes “activos”¹⁷. De esta manera los imanes 2 y 4 se anulan mutuamente y se consigue que el efecto corrector solo sea el equivalente al producido por los imanes 1 y 3.

Los resultados obtenidos en el programa de ordenador se muestran en la [Figura 6.1](#) y en la [Figura 6.2](#) siguientes:

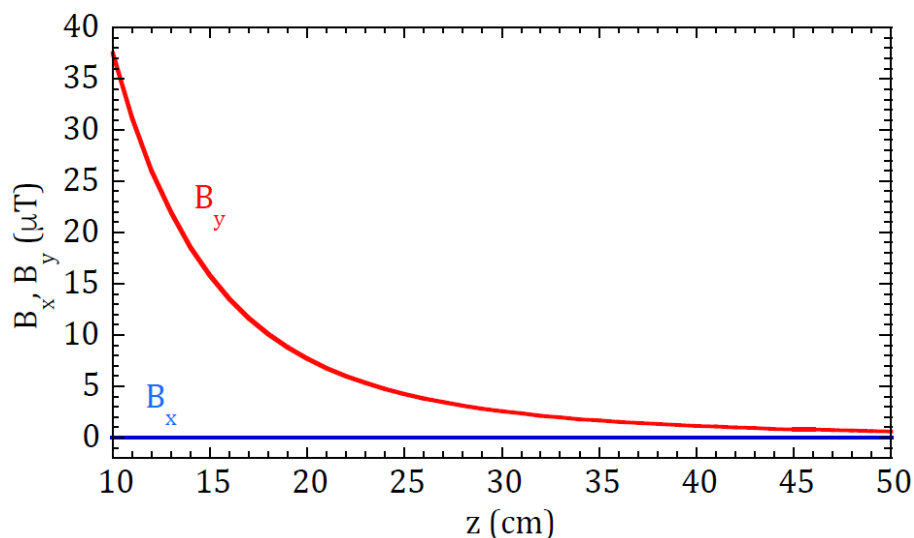


Figura 6.1: Gráfico representando el campo magnético "B" en relación a la distancia "z" (caso de imanes m_1 y m_3 con un valor determinado, imanes m_2 y m_4 valor cero).

Estudiando el gráfico correspondiente de arriba nos indica claramente que el efecto de los imanes longitudinales con respecto a la dirección del campo terrestre no presenta ningún efecto (B_x) debido a que se anulan entre sí. Si nos desplazamos por un momento hasta la [Figura 6.2](#) vemos que la dirección x es la dirección del vector i o la dirección $-x$ es la correspondiente al vector $-i$, con lo que al estar paralelo a la dirección del campo terrestre, no ejerce ningún efecto sobre éste. De hecho, para esta condición, los dos imanes longitudinales se anulan entre sí. Solo es efectiva la corrección de los imanes transversales que actúan corrigiendo la posición de la aguja magnética en la dirección y o lo que es lo mismo en la dirección del vector j .

¹⁷ Denominamos imanes “activos” a los imanes que se colocan transversalmente respecto de la aguja magnética y que son los que influyen a ésta para su compensación.

Los valores del campo magnético generado por dichos imanes 1 y 3 están representados en la [Figura 6.1](#) *versus* distancia desde los imanes correctores a la aguja magnética. En esta figura se ve el campo magnético que generan hacia el Este, derecha, en dirección j .

La mayor intensidad del campo será de $38 \mu\text{T}$ (miliTeslas) a una distancia de 10cm de la aguja magnética. Esta distancia no será la utilizada, debido a que para evitar la generación de desvíos sextantales, mantendremos una distancia mínima de al menos tres veces la longitud de los imanes compensadores. Al ser los imanes de una longitud de 4 cm la distancia mínima debería ser de unos 12cm. Luego, el campo va variando hacia cero, a medida que el corrector se separa, aproximándose a los 50 cm de distancia de la aguja magnética. En realidad el prototipo se ha construido para que trabaje en un rango de distancias entre 15,8cm y 35,4cm con lo que en principio no alcanzaremos esas distancias máximas.

Para una distancia de 15,8 cm entre imanes y aguja los imanes correctores nos generan un campo de $14 \mu\text{T}$ aproximadamente, valor máximo al que podemos aspirar debido a la construcción de nuestro sistema. Por el contrario el valor mínimo viene determinado por la máxima distancia de 35,4 cm de nuestro prototipo que nos produce un campo mínimo de $2 \mu\text{T}$ aproximadamente.

Teniendo en cuenta lo anterior pasamos a analizar qué cuantía de corrección nos genera dicho campo. En la [Figura 6.2](#) vemos que la corrección θ *versus* distancia como los Nortes de los imanes compensadores, rojos, están en dirección Oeste, repelen al Norte de la aguja hacia el Este.

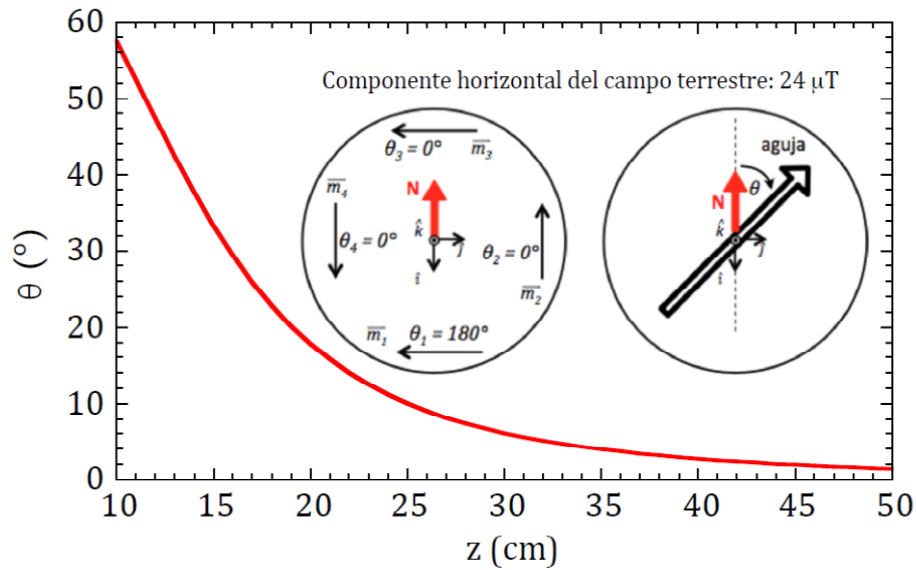


Figura 6.2: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z" (caso de imanes m_1 y m_3 con un valor determinado, imanes m_2 y m_4 valor cero).

En la [Figura 6.2](#) se muestra la corrección de un número determinado de grados en función de la distancia del corrector a la aguja magnética. En este gráfico se ve que la mayor corrección que se puede ejecutar con el posicionamiento de los imanes es de 57° a una distancia de unos 10cm y el valor mínimo que podemos obtener es de $1,5^\circ$ a una distancia de 50cm. Como nuestro prototipo trabajará entre unos 15,8cm y 35,4cm los perfiles de corrección serán de entre 30° y $3,8^\circ$. Por lo tanto sabiendo qué desvío tenemos que corregir pondríamos el plato a la distancia adecuada para esa corrección necesaria.

Esto, en principio, puede resultar fácil de entender, pero a medida que avancemos se irá complicando, debido a que por el momento, estamos realizando un estudio sencillo y direccionado a un solo desvío, cosa que no es del todo cierta, ya que habría que añadir hasta un mínimo de 5 desvíos diferentes y sus correcciones, amén de las interacciones de dichos imanes correctores entre ellos, que indudablemente harían variar la corrección efectuada por el primer par de imanes.

Especial 2. Sería exactamente igual a lo comentado en la situación 1 anterior, con la salvedad de que los imanes "activos" 1 y 3 se orientan al Este, manteniendo los imanes 2 y 4 anulados. Los valores resultantes en la situación 2 son idénticos pero de signo contrario al de la situación 1. La corrección se produce en dirección $-j$.

Especial 3. Mantenemos anulados los imanes 2 y 4 y situamos los imanes “activos” 1 en dirección casi Este, 10° desviado hacia el Norte y el 3 en posición Oeste [Figura 6.3](#).

En la [Figura 6.4](#) se muestra con claridad el campo generado por los dos imanes “activos”, en dirección x y dirección y . La de mayor interés para nosotros es la generada en dirección y , que es la que nos produce una corrección efectiva, por lo tanto en principio prescindimos de la generada en la dirección x . Aclaremos que si el imán 1 estuviera en posición exacta Este, rojo a la derecha, el efecto de los imanes sería cero debido a que se auto-eliminarían. Al haber realizado un giro mínimo del imán 1 conseguimos minimizar el efecto compensador del imán 3.

Se ve claramente que para las distancias en las que trabajamos de 15,8 cm el campo generado [Figura 6.4](#) sería de $0,15 \mu\text{T}$, y para 35,4 cm prácticamente $0 \mu\text{T}$.

Hablando de capacidades de corrección de los imanes en la [Figura 6.3](#) vemos que el efecto de los imanes en esta posición es muy exiguo, dando como resultado una máxima corrección de $0,7^\circ$ a una distancia de 10cm, distancia a la cual no es operable. Por otro lado a las distancias operables, la corrección sería entre $0,25^\circ$ y $0,03^\circ$, para el ámbito de trabajo de nuestro prototipo entre 15,8 cm y 35,4 cm, lo cual nos dice bien poco para los valores que se utilizan en las compensaciones, por ser los anteriores demasiado pequeños para nuestras necesidades. De todas maneras dejamos constancia de los resultados obtenidos pues serán de utilidad en un estadio posterior.

Esto quiere decir que en una posición cercana a la anulación recíproca, la corrección es muy pequeña, y disminuye a medida que nos acercamos a la anulación de ambos imanes.

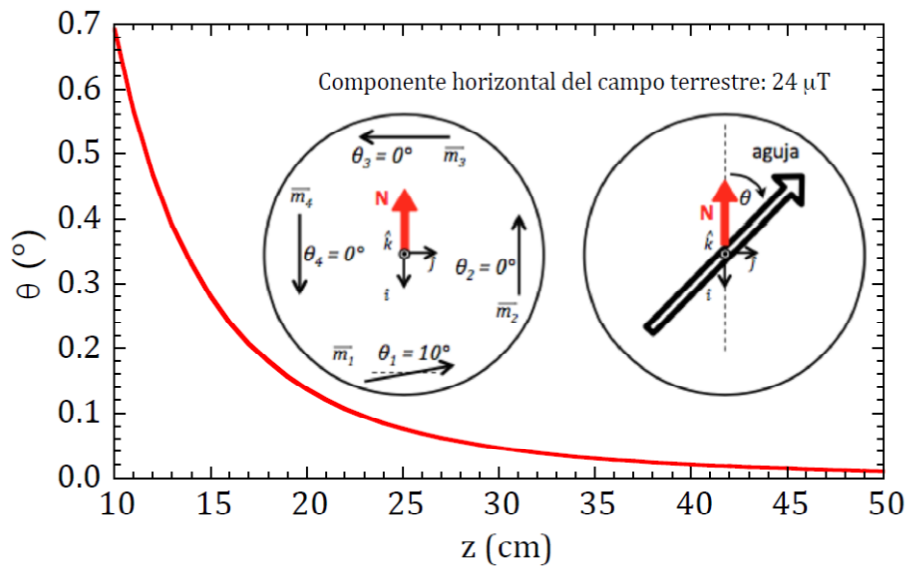


Figura 6.3: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z" (caso de imanes m_1 y m_3 , con valores regulados, e imanes m_2 y m_4 con valor cero).

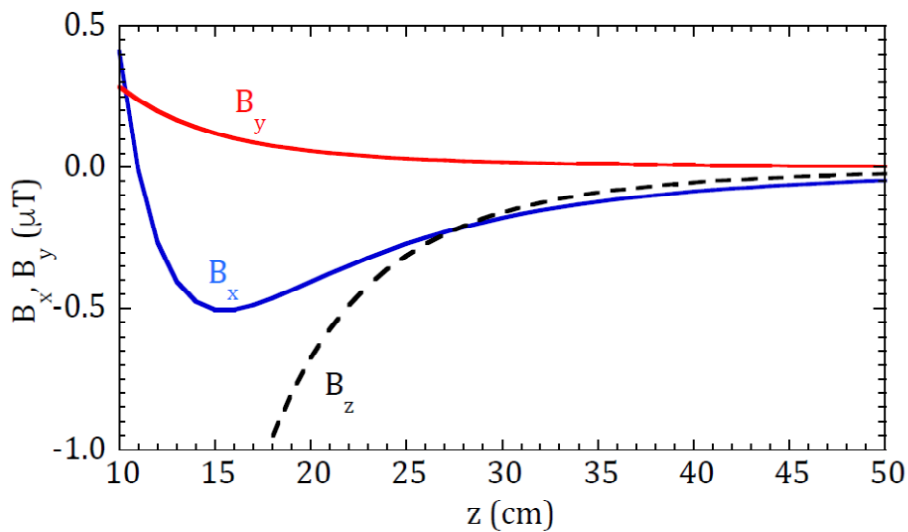


Figura 6.4: Gráfico representando el campo magnético "B" en relación a la distancia "z" (caso de imanes m_1 y m_3 , con valores regulados, e imanes m_2 y m_4 con valor cero).

Especial 4. Igual que el caso anterior de situación 3 condición 1 los imanes 2 y 4 están auto-anulados. La posición de los imanes "activos" 1 y 3 solo difieren de la condición 1 en que el imán 1 en vez de estar desviado hacia el Norte, en esta ocasión se encuentra desviado hacia el Sur pero la misma cantidad de -10° . Si miramos tanto el campo magnético generado [Figura 6.6](#) como la capacidad de corrección de esta situación y esta condición [Figura 6.5](#) se ve que son iguales en

valores absolutos, con lo que no comentaremos más que la situación 3 en ambas condiciones 1 y 2 son iguales.

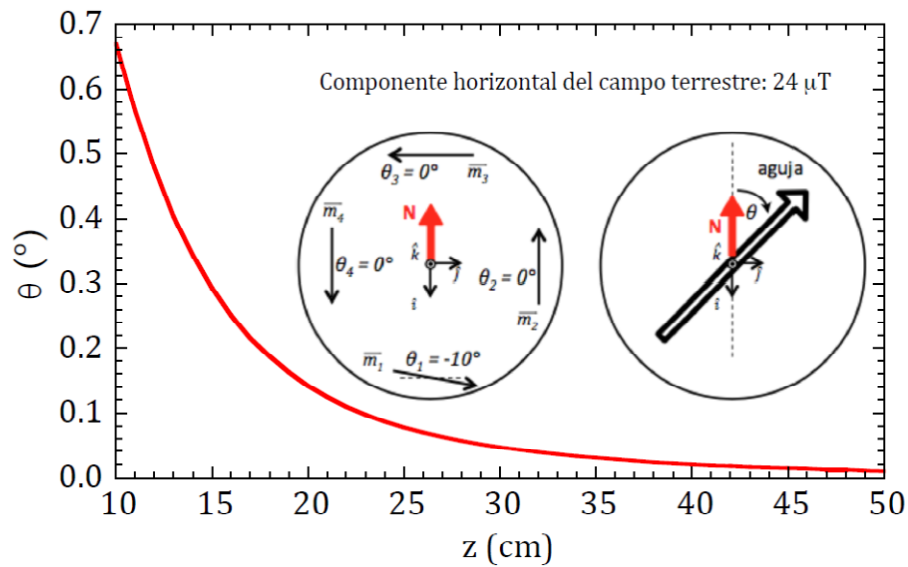


Figura 6.5: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z" (caso de imanes m_1 y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).

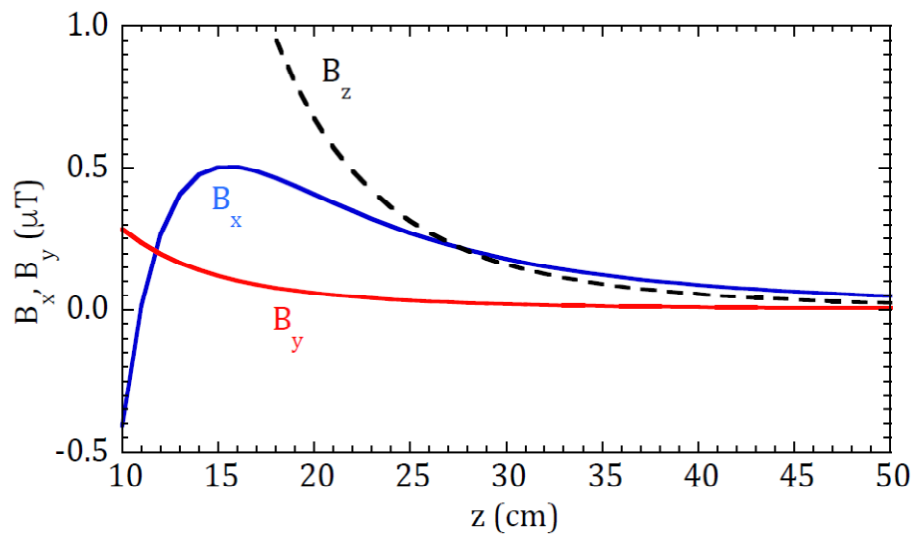


Figura 6.6: Gráfico representando el campo magnético B en relación a la distancia "z" (caso de imanes m_1 y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).

A una distancia máxima de 35,4cm la diferencia entre ambos, es por decirlo de alguna manera, nula, es decir para los dos posicionamientos del imán 1 en $+10^\circ$ o en -10° el efecto es casi el mismo. Por otra parte si se va desplazando hacia

distancias más cercanas entre los imanes compensadores y la aguja magnética, en la [Figura 6.5](#) para conseguir una corrección de $0,05^\circ$ necesitamos de una distancia de 22,6cm mientras que para corregir el mismo error en el caso anterior necesitamos de 22,7cm con lo cual estamos hablando de diferencias de 1 milímetro de distancia para la misma corrección. Nos podemos hacer una ligera idea de que son valores que rozan lo ridículo si tenemos en cuenta que los errores manejados son del orden de más de 1° casi siempre, máxime cuando la IMO, establece errores próximos a $0,5^\circ$.

Por último, como la distancia mínima a la que podemos actuar, es de 15,8cm, la corrección que podemos conseguir es de $0,26^\circ$ en la situación 3 condición 2, mientras que en la situación 3 condición 1 conseguíamos $0,25^\circ$ de corrección, con lo que también se verifica que la diferencia entre posicionar en $+10^\circ$ o -10° la efectividad es prácticamente la misma.

Se ha realizado un estudio variando los imanes “activos” colocando el imán 3 hacia el Este, rojo a la derecha y el imán 1 hacia el Oeste, desviado 10° hacia el Norte y hacia el Sur, dando los mismos resultados que las [Figura 6.3](#) y [Figura 6.5](#) con lo que solo mencionamos que se han realizado las pruebas y las mediciones han sido similares a las anteriores.

Especial 5. Los imanes 2 y 4 siguen estando anulados como en las situaciones 1, 2, y 3 condiciones 1 y 2, el imán 3 también se direcciona hacia el Oeste, rojo a la izquierda para ver de nuevo la capacidad de corrección de los imanes 1 y 3. En esta situación y condición solo vamos a variar la condición del imán 1 que está direccionado también hacia el Oeste como el 3 pero un poco desviado hacia el Norte siendo su ángulo $+170^\circ$, el cual se computa de su posición inicial 0° que es la dirección hacia el Este, rojo a la derecha. El resultado del campo generado se muestra en la [Figura 6.7](#). En cuanto a su capacidad de corrección se muestra claramente en la [Figura 6.9](#). Aquí vemos que para los valores de distancia en que nos desenvolvemos con nuestro modelo, nos dan valores de $29,5^\circ$ de corrección para una distancia mínima de 15,8 cm y de $4,2^\circ$ para una distancia máxima de 35,4 cm. Por lo tanto, vemos que cuando la posición de uno de los imanes correctores comienza a disminuir su posición hacia el cero, que sería la auto-anulación de los dos imanes-pareja, la pérdida del potencial de corrección también es variable pudiéndose corregir desde unos valores máximos de $29,5^\circ$ hasta unos mínimos de $4,2^\circ$ grados.

Especial 6. El posicionamiento de los imanes 2, 4 y 3 igual que en la situación anterior 4 condición 1 y el imán 1 variando de 10° hacia el Norte a 10° hacia el Sur con lo se definiría el valor de -170° a partir de su origen direccionado hacia el Este, rojo a la derecha. En esta situación y condición vemos la representación del campo magnético generado en la [Figura 6.8](#) que si la comparamos con la [Figura 6.7](#) son casi iguales siendo la diferencia mínima y el signo de la corrección que se genera en dirección al eje x y $-x$ respectivamente.

En cuanto a la capacidad de corrección de ambas situaciones se ve claramente en la comparativa de la [Figura 6.9](#) y la [Figura 6.10](#) que ambas son casi idénticas siendo la corrección, con un desvío hacia -170 , a la distancia mínima de $15,8$ cm de $30,5^\circ$ y a la distancia de $35,4$ cm de $3,6^\circ$.

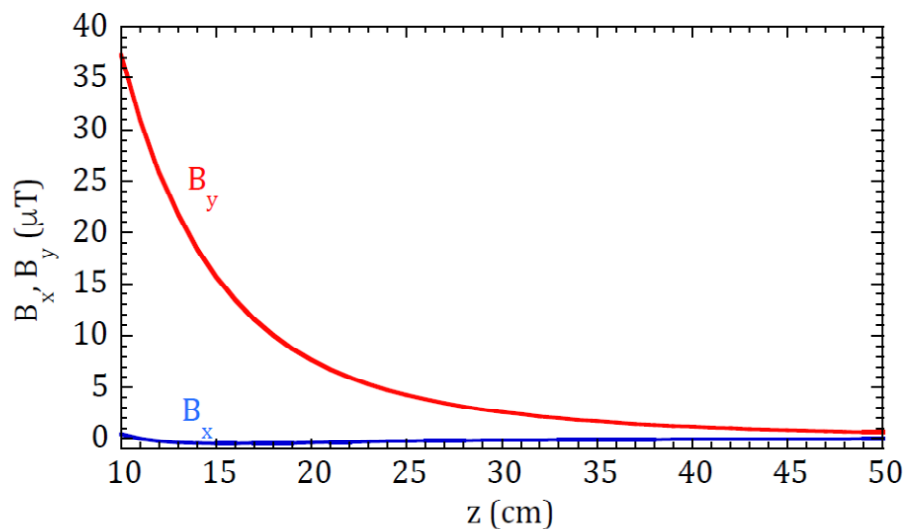


Figura 6.7: Gráfico representando el campo magnético B en relación a la distancia "z" (caso de imanes $m_1(+170^\circ)$ y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).

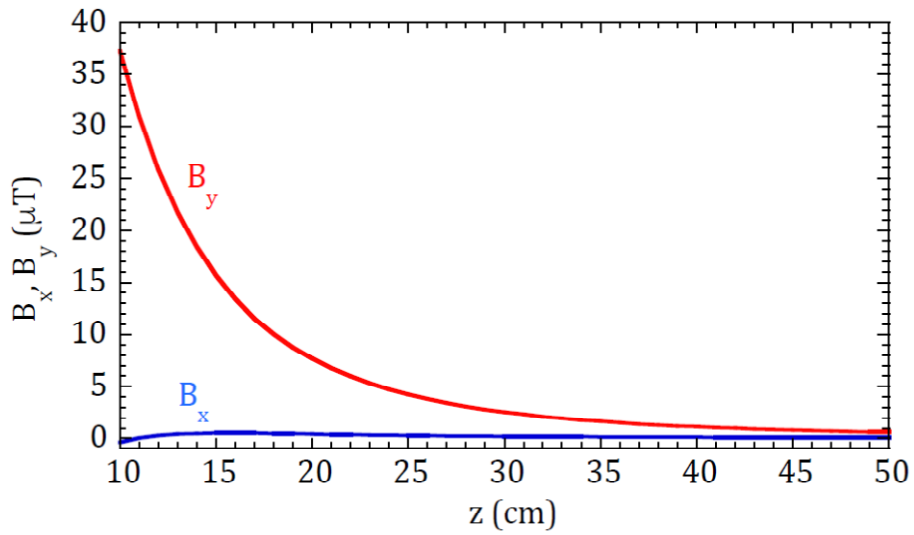


Figura 6.8: Gráfico representando el campo magnético B en relación a la distancia "z" (caso de imanes m_1 (-170°) y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).

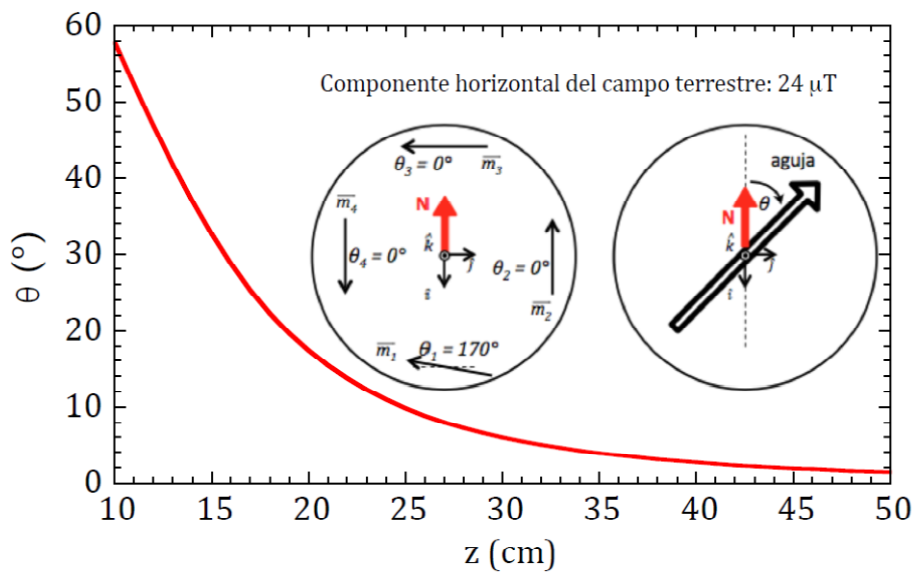


Figura 6.9: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z" (caso de imanes m_1 ($+170^\circ$) y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).

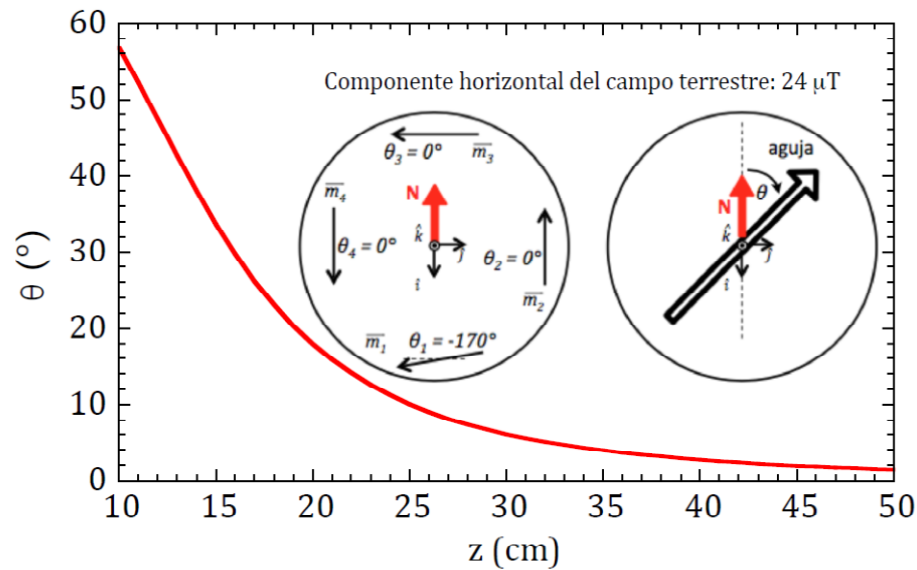


Figura 6.10: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z" (caso de imanes m_1 (-170°) y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).

Las situaciones y condiciones equivalentes al cambio simétrico de los imanes "activos" con respecto a la aguja magnética que serían los fijados con el imán 3 hacia el Este, rojo a la derecha, no los representamos, aunque se ha realizado su análisis, debido a que sus resultados son exactamente los mismos que las situaciones 4 condiciones 1 y 2 anteriores.

Especial 7. Los imanes 2 y 4 siguen estando anulados como en los especiales 1, 2, 3, 5 y 6, el imán 3 también se direcciona hacia el Oeste, rojo a la izquierda, para ver de nuevo la capacidad de corrección de los imanes 1 y 3. En esta situación y condición solo vamos a variar la posición del imán 1 hasta una posición de 90° desfasado desde su referencia de origen.

En la [Figura 6.11](#) se aprecia claramente el campo magnético generado por el posicionamiento estudiado. El campo B_y es el que interesa en éste y los demás casos estudiados, pero incidimos en la parte inherente al campo generado B_x que se comentará con más detenimiento su interés un poco más adelante. En cuanto a la capacidad de corrección de la composición de imanes se ve en la [Figura 6.13](#) para una distancia de 15,8 cm de distancia mínima es de unos $14,8^\circ$, siendo de $1,9^\circ$ para una distancia máxima de 35,4 cm.

Especial 8. Esta situación y condición es exactamente la misma que la **especial 7** anterior. Los imanes 2 y 4 siguen estando anulados como en las situaciones 1, 2, 3

y 4 condiciones 1 y 2, el imán 3 también se direcciona hacia el Oeste, rojo a la izquierda, para ver de nuevo la capacidad de corrección de los imanes 1 y 3. En esta situación y condición solo vamos a variar la posición del imán 1 hasta una posición de -90° desfasado desde su referencia de origen.

En la [Figura 6.12](#) se aprecia claramente el campo magnético generado por el posicionamiento estudiado. Si lo comparamos detenidamente con el campo representado en la [Figura 6.11](#) se puede apreciar que son exactamente iguales excepto por el campo B_x que se comentará mas tarde.

En cuanto a la capacidad de corrección de dicha composición aquí si que vemos una diferencia apreciable entre la [Figura 6.13](#) y la [Figura 6.14](#). Vamos a estudiar un poco sus diferencias.

En la [Figura 6.13](#) para un valor de distancia mínimo de 15,8 cm no resulta un valor correctivo de $14,8^\circ$ y para una distancia máxima de 35,4 cm de $1,9^\circ$. Si ahora vemos que capacidad correctiva nos genera la otra composición representada en la [Figura 6.14](#) se obtiene, para un mínimo de 15,8, un valor de casi $18,5^\circ$ y para un máximo de distancia de 35,4, una corrección de $1,9^\circ$.

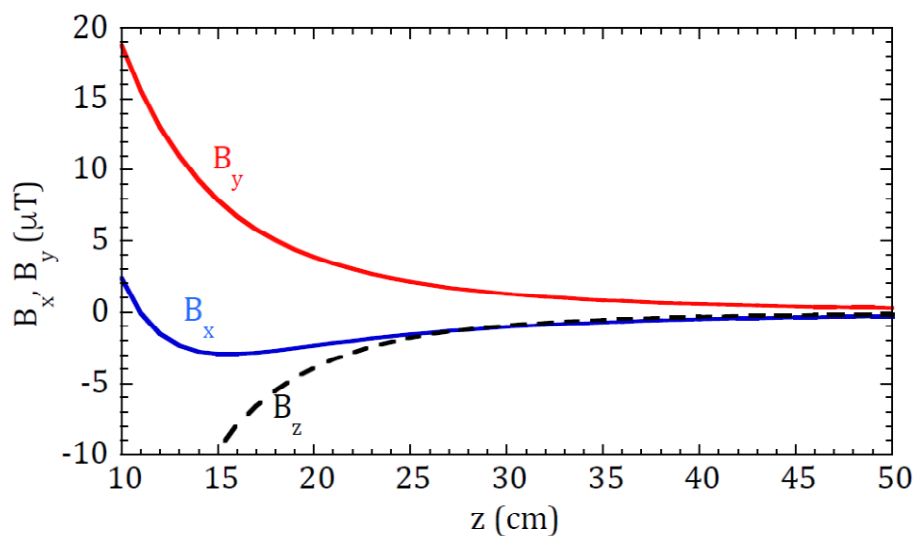


Figura 6.11: Gráfico representando el campo magnético B en relación a la distancia "z" (caso de imanes $m_1(+90^\circ)$ y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).

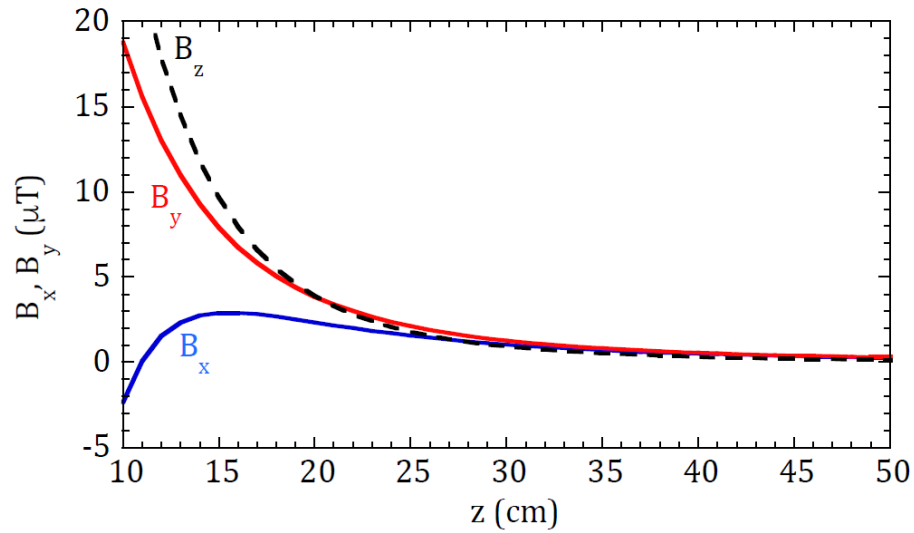


Figura 6.12: Gráfico representando el campo magnético B en relación a la distancia “ z ” (caso de imanes m_1 (-90°) y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).

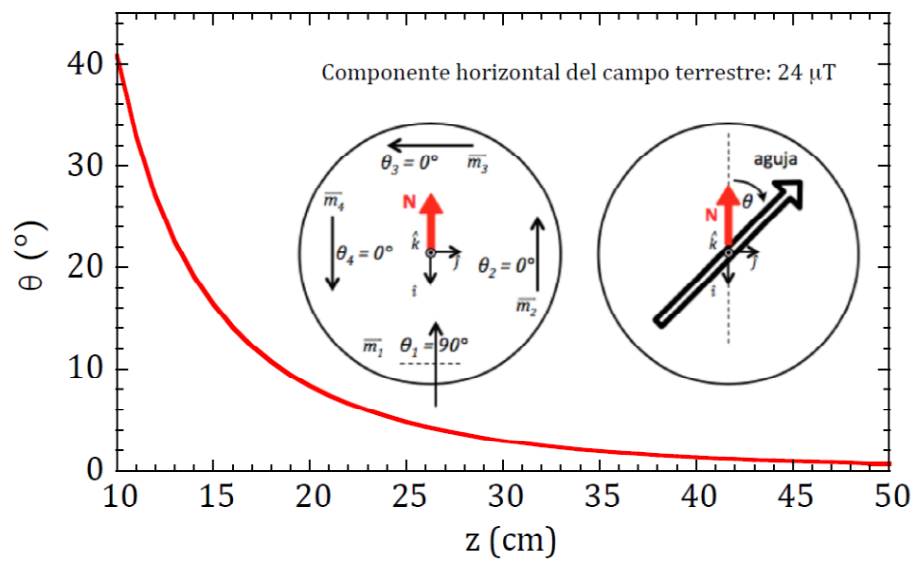


Figura 6.13: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “ z ” (caso de imanes m_1 ($+90^\circ$) y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).

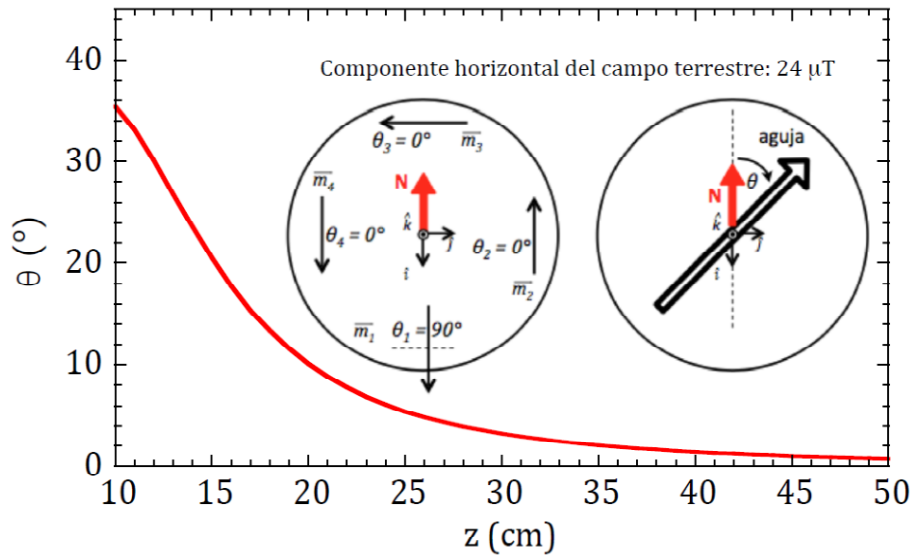


Figura 6.14: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z" (caso de imanes m_1 (-90°) y m_3 , con valores regulados y m_2 y m_4 valor cero).

Como se comentará en las conclusiones, la posición de un imán, o imanes, en el sentido del campo magnético terrestre, o contrario a él, influye de manera importante sobre la capacidad correctora del imán "activo" que actúa transversalmente al sentido del campo terrestre y que realmente genera una corrección en la aguja magnética.

Es importante hacer constar que cuando uno de los imanes "activos" se gira hasta conseguir el posicionamiento de 90° el valor de corrección en todo el ámbito de operación del sistema disminuye hasta la mitad de la capacidad total producida por dos imanes correctores en la misma dirección, ver la diferencia entre la [Figura 6.2](#) y la [Figura 6.13](#), es decir, si a una determinada distancia con los dos imanes "activos" en la misma dirección la corrección es "x", con un imán girado 90° , en la dirección del campo magnético terrestre, la capacidad de corrección es "x/2".

También se ha podido constatar, que si el imán que giramos, se coloca a $\frac{1}{4}$ de la posición inicial, en la misma dirección del campo magnético terrestre, la corrección mengua aproximadamente en $\frac{1}{4}$ del valor total de compensación del par de imanes "activos" y si se gira $\frac{3}{4}$ de la posición inicial el valor se reduce en $\frac{3}{4}$ del total que genera el par "activo". Por lo tanto teniendo definida la reducción de la corrección en cuartos podemos extrapolar los valores máximos en la misma relación para conseguir el número exacto de grados de corrección realizando el giro correspondiente en uno de los imanes "activos".

A partir de estos casos, vamos a prescindir de los gráficos de representación de los diferentes campos magnéticos (B) excepto si se hacen necesarios, debido a que nuestro mayor interés, es la corrección (θ) que resulta de cada composición de imanes y la dirección en la que afecta a la aguja magnética.

También aclaramos que a partir de este momento vamos a utilizar la nomenclatura de **Situación** y **Condición** para los diferentes casos, debido a que estos casos van a ser los principales de estudio del efecto corrector del sistema en estudio.

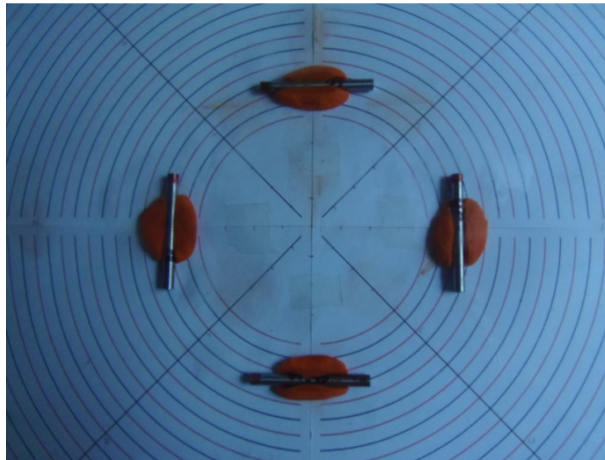


Figura 6.15: Fotografía de cuatro imanes colocados en posición dos a dos. Superior e inferior con el rojo hacia la izquierda, los laterales hacia arriba.

En la [Figura 6.15](#) se puede apreciar el posicionamiento de cuatro imanes en el que se ve a una pareja orientado con los rojos hacia la izquierda y la otra pareja con los rojos hacia arriba.

De esta fotografía, realizamos otra, donde apreciamos en un espectrograma, conseguido con limaduras de hierro, los campos generados por los diferentes polos de los distintos imanes. Hasta aquí, aparentemente todo está claro. Esto lo presentamos para, posteriormente visualizar mejor la explicación, el distinto efecto que se genera en los desvíos dependiendo del posicionamiento variable de los distintos pares de imanes.

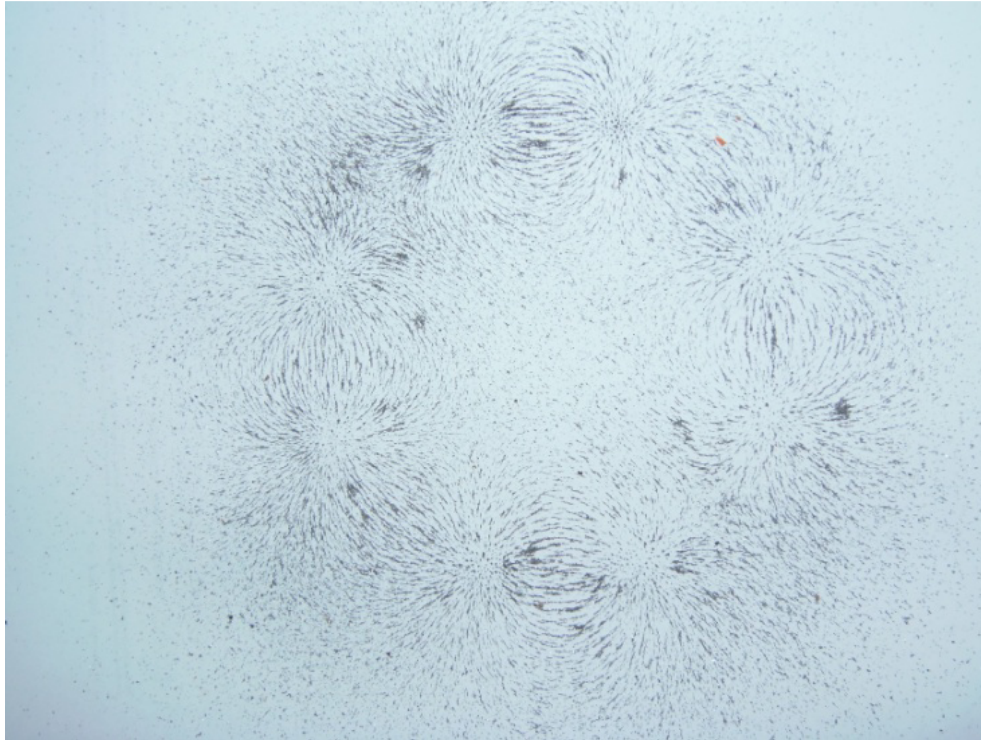


Figura 6.16: Fotografía de los campos generados por efecto de los cuatro imanes de la figura 6.15.

En la [Figura 6.16](#), se aprecia claramente que la acción del polo rojo del imán superior, orientado hacia la izquierda, y el polo rojo del imán izquierdo, orientado hacia arriba, se anulan mutuamente generando un punto de campo magnético nulo en ese cuadrante. También se aprecia, que los campos generados por cada uno de los imanes son normales.

Por otra parte, el polo azul del imán superior, situado en la parte derecha superior de la Figura, y el polo rojo del imán situado a la derecha, con el polo rojo hacia arriba, genera un campo adicional cuyo efecto podemos decir que puede ser un efecto cuadrantal, al igual que el campo opuesto a ésta en la parte inferior izquierda, pero que no estudiaremos en esta tesis por no ser objeto de interés este tipo de corrección para nuestro estudio.

En un futuro puede que sea interesante estudiar este efecto y su afección a la aguja magnética.

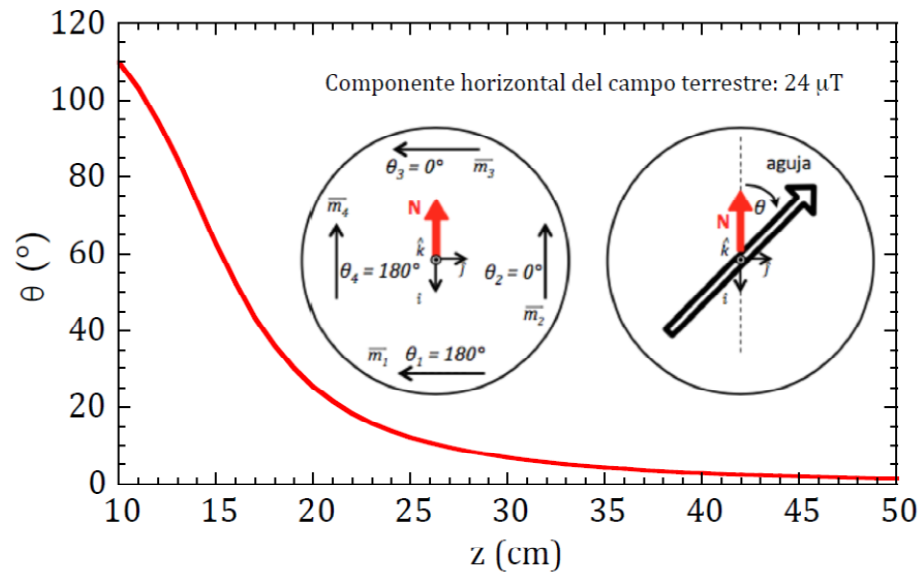


Figura 6.17: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte igual que la dirección de la proa del buque (caso de imanes m_1 (180°) m_2 (0°) m_3 (0°) y m_4 (180°))

Situación 1 condición 1. Los imanes "activos" 1 y 3 se direccionan hacia el Oeste, rojos hacia la izquierda, o lo que es lo mismo a babor en el argot eminentemente marino, y los "inactivos"¹⁸ los dos hacia el Norte, rojos hacia arriba, o lo que es lo mismo rojos a proa. Este posicionamiento de los imanes [Figura 6.17](#), nos genera la corrección máxima de los imanes "activos", que conjuntamente con el efecto incremental de los imanes longitudinales, genera la máxima corrección que se pueda efectuar con ellos. Vemos que a la mínima distancia a la que podemos colocar los imanes de 15,8 cm la corrección que se puede efectuar es de aproximadamente 55° y la mínima a una distancia de 35,4 cm es de unos $4,2^\circ$. Para ver todos los valores de distancia intermedios los vemos en la [Tabla 4](#) columna 3^a desde la izquierda.

La [Figura 6.18](#) muestra la **situación 1 condición 2**. Imanes 1 y 3 "activos" direccionando hacia la izquierda, rojos hacia babor, y los imanes 2 y 4 "inactivos" direccionando hacia el Sur, hacia abajo o rojos hacia popa. A la figura anterior le corresponde una generación de campos magnéticos que lo representamos a continuación.

¹⁸ Denominamos imanes "inactivos" a aquellos que se direccionan en el sentido de magnetismo terrestre, paralelos a la aguja magnética y a la dirección del campo terrestre y que en principio no afectan a la aguja magnética, pero si tienen una influencia en la capacidad de los imanes "activos" según en la dirección que apuntan aquellos.

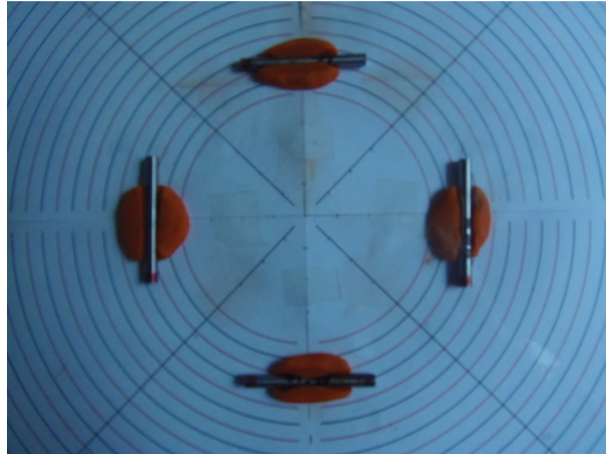


Figura 6.18: Fotografía de cuatro imanes colocados en posición dos a dos. Superior e inferior con el rojo hacia la izquierda, los laterales hacia abajo.

El campo magnético que se produce por efecto de los cuatro imanes en la posición comentada se puede apreciar en la [Figura 6.19](#).

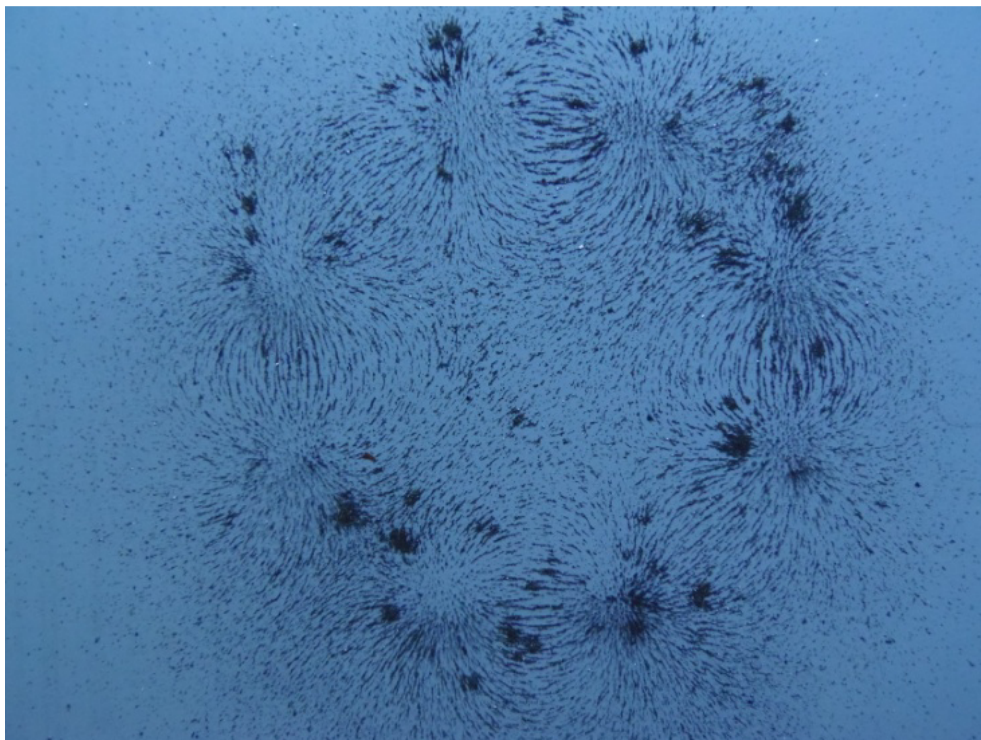


Figura 6.19: Fotografía de los campos generados por efecto de los cuatro imanes de la figura 6.18.

El estudio de la efectividad de dicho planteamiento, lo podemos ver en la [Figura 6.20](#).

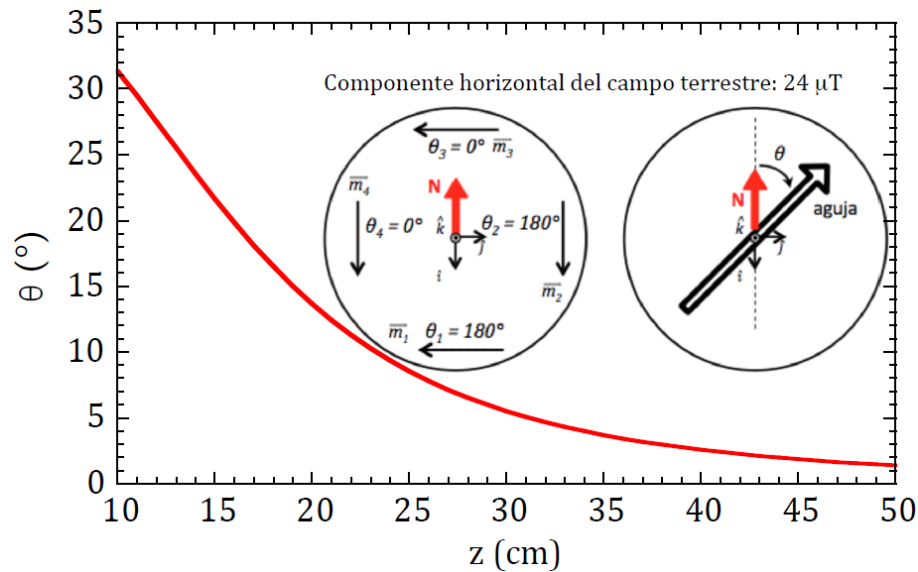


Figura 6.20: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z”. El campo terrestre en dirección Norte igual que la dirección de la proa del buque (caso de imanes m_1 (180°) m_2 (180°) m_3 (0°) y m_4 (0°)).

En dicha Figura 6.20, los imanes “activos” siguen siendo los mismos y en la misma dirección que en el caso anterior hacia el Oeste, o rojos a babor. En este caso los imanes “inactivos” están direccionados en sentido contrario al campo magnético terrestre es decir hacia el Sur, o rojos a popa. Como se ve en el resumen de los resultados de la Tabla 5 , columna 3 desde la izquierda al igual que en la figura anterior, su máxima capacidad de corrección es de aproximadamente $20,2^\circ$ a una distancia mínima de 15,8cm mientras que en el caso anterior (situación 1 condición 1), solo difiriendo en el posicionamiento de los imanes “inactivos”, la capacidad era de hasta 55° .

Por otro lado la capacidad mínima es de unos $3,4^\circ$ a una distancia máxima de 35,4cm, que comparativamente, en el caso anterior de la Figura 6.17 es de aproximadamente $4,2^\circ$. Para ver los valores intermedios de las distancias de las distintas correcciones se muestran en la Tabla 5.

Como se puede apreciar en la Figura 6.17 y Figura 6.20 debido a la interacción entre los distintos imanes, tenemos como resultado visible que cuando los imanes que son “inactivos”, se colocan en la misma dirección que el campo magnético terrestre, la acción correctora de los imanes “activos” es mayor que cuando el par “inactivo” esta en dirección Sur u opuesta a dicho campo magnético. Con esta premisa tan importante habrá que comentar más tarde el interés que puede generar tal afirmación.

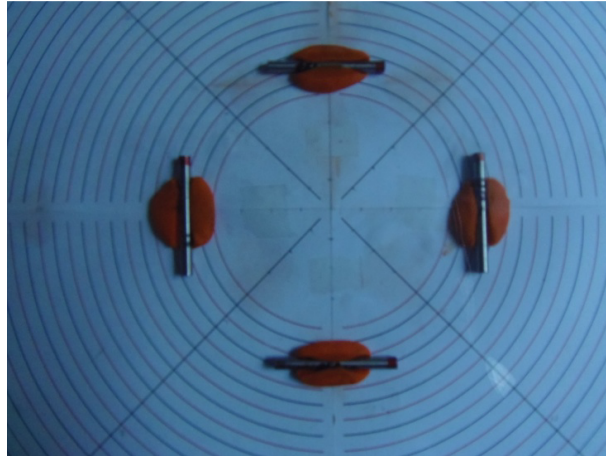


Figura 6.21: Fotografía de cuatro imanes colocados en posición dos a dos. Superior e inferior con el rojo hacia la derecha, los laterales hacia arriba.

En la [Figura 6.21](#) vemos un nuevo posicionamiento correspondiente a una nueva situación y condición. El campo que generan dichos imanes lo podemos verificar en la [Figura 6.22](#), donde se pueden apreciar los campos que nos van a generar los imanes.

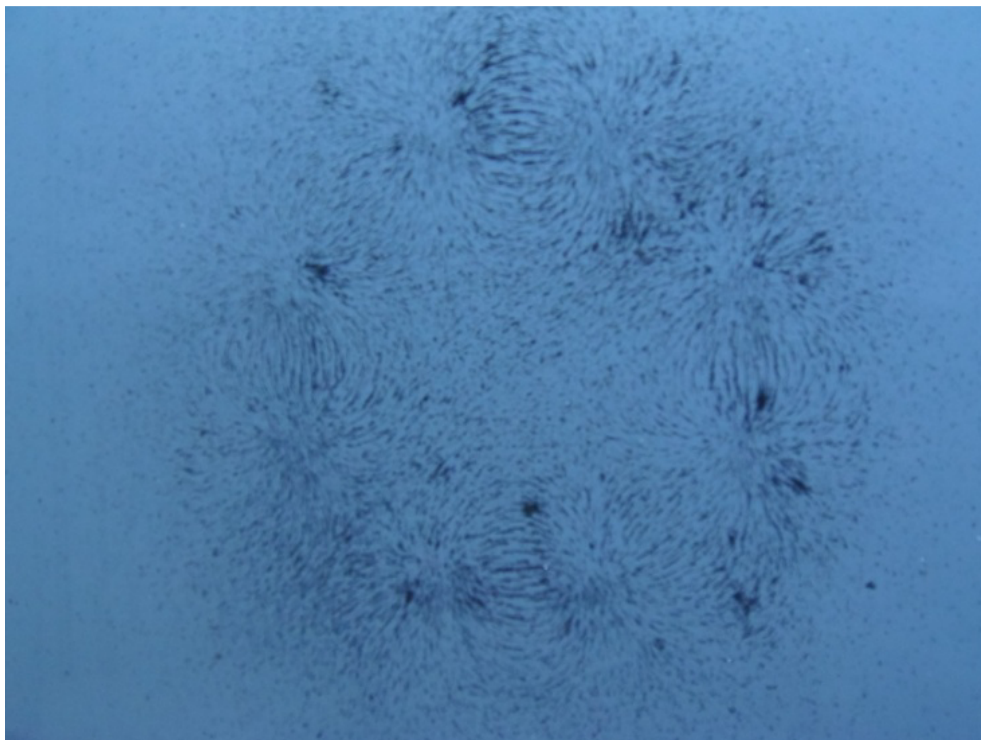


Figura 6.22: Fotografía de los campos generados por efecto de los cuatro imanes de la figura 6.21.

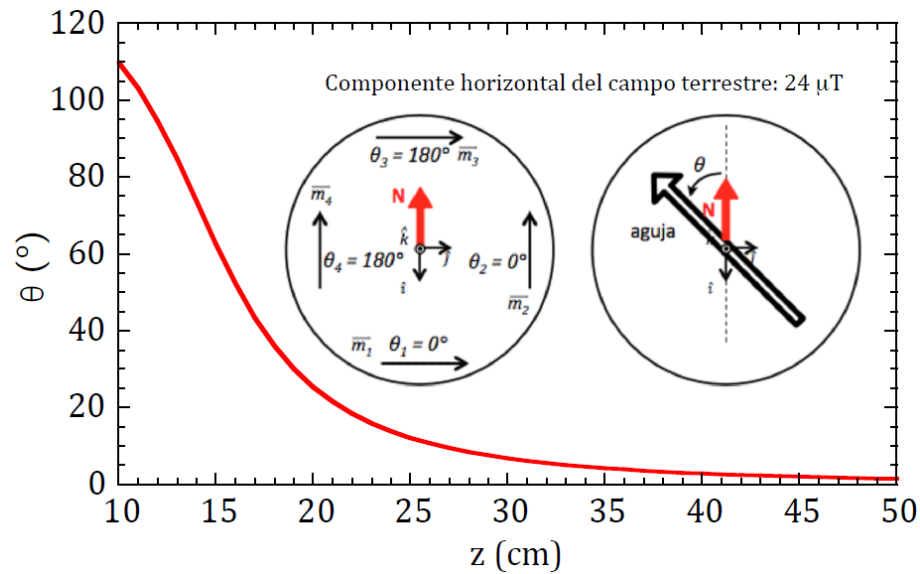


Figura 6.23: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z”. El campo terrestre en dirección Norte igual que la dirección de la proa del buque (caso de imanes $m_1 (0^\circ)$ $m_2 (0^\circ)$ $m_3 (180^\circ)$ y $m_4 (180^\circ)$).

La **situación 2 condición 1**. Se indica en la Figura 6.23. Se ve que la dirección de los imanes “activos” se ha modificado indicando los mismos hacia el Este, o rojos a estribor y por otro lado los imanes “inactivos” los hemos colocado en la misma dirección que el campo magnético terrestre, rojos a proa. Si estudiamos comparativamente todos los valores de la Figura 6.17 y los comparamos con los de la Figura 6.23, se puede apreciar tanto en la figura como Tabla 4 columna 2ª desde la izquierda que los resultados son idénticos con lo que podemos decir que la capacidad de corrección de los imanes, en cuanto a valor absoluto, es exactamente la misma estén los imanes “activos” con los rojos a babor o a estribor, siendo su única diferencia el sentido en la que obra la corrección.

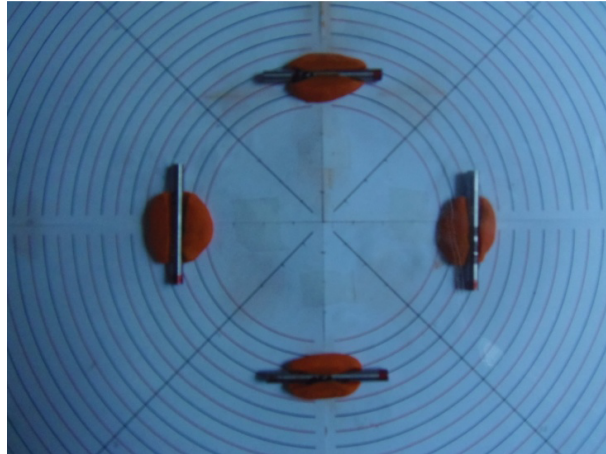


Figura 6.24: Fotografía de cuatro imanes colocados en posición dos a dos. Superior e inferior con el rojo hacia la derecha, los laterales hacia abajo.

El aura del campo magnético generado por la posición de los imanes de la [Figura 6.24](#) se ve en la [Figura 6.25](#).

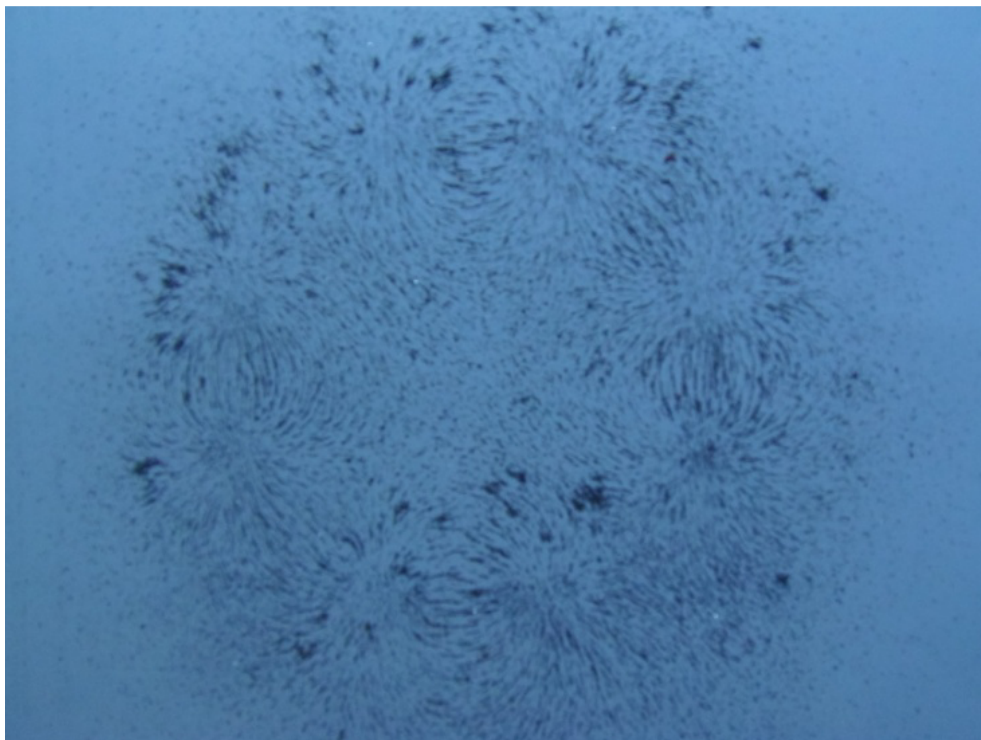


Figura 6.25: Fotografía de los campos generados por efecto de los cuatro imanes de la figura 6.24.

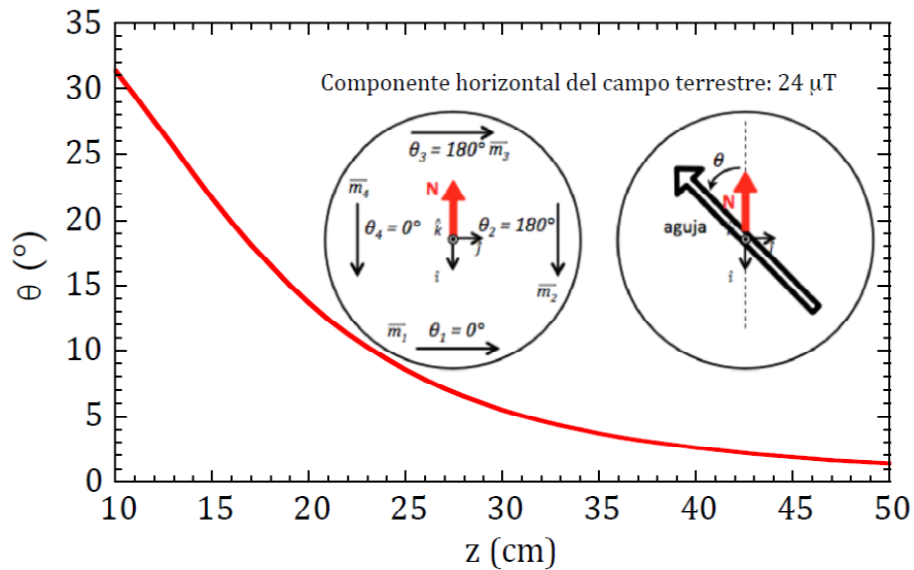


Figura 6.26: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z”. El campo terrestre en dirección Norte igual que la dirección de la proa del buque (caso de imanes m_1 (0°) m_2 (180°) m_3 (180°) y m_4 (0°)).

Situación 2 condición 2. En el presente posicionamiento que nos ocupa [Figura 6.26](#) hemos variado solo la posición de los imanes “inactivos” con referencia a la situación 2 condición 1 de la [Figura 6.20](#) y comparando los valores con dicha figura se aprecia que dichos valores son idénticos entre sí, así como se puede apreciar comparando los valores que se presentan en la [Tabla 5](#) columna 2ª desde la izquierda. Por lo tanto al igual que en el comentario anterior sobre la igualdad entre las situaciones y condiciones correspondientes a las [Figura 6.17](#) y [Figura 6.23](#), en éstos también se cumple la premisa de que los resultados son idénticos entre ellos.

Situación 3 condición 1. En la presente situación cambia un poco el estatus general de los imanes comparativamente con las situaciones y condiciones anteriores. Vamos a aclarar un poco los cambios efectuados. En primer lugar tenemos que el indicador del campo magnético terrestre, ahora se direcciona hacia la izquierda en lugar de hacia arriba. Básicamente lo que hemos realizado es definir el gráfico como si hubiéramos borneado con el buque 90° a estribor, como el campo magnético terrestre siempre indica el Norte, es como si la proa de nuestro buque indicara una diferencia de 90° respecto a la dirección del Norte y además hacia estribor, con lo que nosotros estamos arrumbados hacia el Este. Los imanes 1 y 3 siguen estando en la proa y en la popa de la aguja magnética. Los imanes 2 y 4 siguen estando a babor y a estribor de la aguja. Hay que clarificar que en la presente situación, tal y como se ve en la [Figura 6.27](#), los imanes 1 y 3 han

pasado de ser “activos” a ser “inactivos”, y los “inactivos” a ser “activos”. Los imanes 2 y 4 serán los que corrijan el desvío de la aguja y los imanes 1 y 3 producirán un incremento o decremento potencial de los imanes 2 y 4 según se orienten en dirección al campo magnético terrestre o en dirección opuesta al mismo.

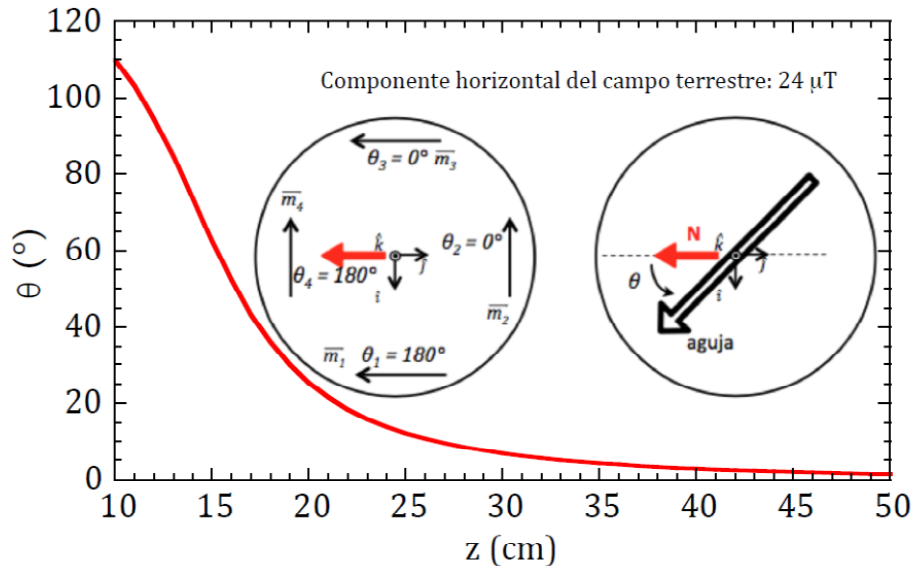


Figura 6.27: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z”. El campo terrestre en dirección Norte. En los siguientes casos la proa del buque la hemos girado hacia el Este (caso de imanes m_1 (180°) m_2 (0°) m_3 (0°) y m_4 (180°)).

Si nos fijamos en la [Figura 6.27](#) y la comparamos con la [Figura 6.23](#) vemos que los dos son exactamente iguales. La diferencia entre ellos estriba en que los imanes que anteriormente eran “activos” se han convertido en “inactivos” y viceversa. En cuanto a capacidad de corrección, como los imanes son idénticos en cuanto a su momento magnético, también lo serán sus capacidades de corrección. Si volvemos a referirnos a la [Tabla 4](#) columna 4ª vemos que los resultados son exactamente los mismos. Por lo tanto las situaciones y las condiciones vistas con anterioridad se vuelven a repetir en cuanto a capacidad de corrección de los mismos. En adelante nos referiremos a las Figuras, para ver la similitud de las correcciones de los distintos posicionamientos.

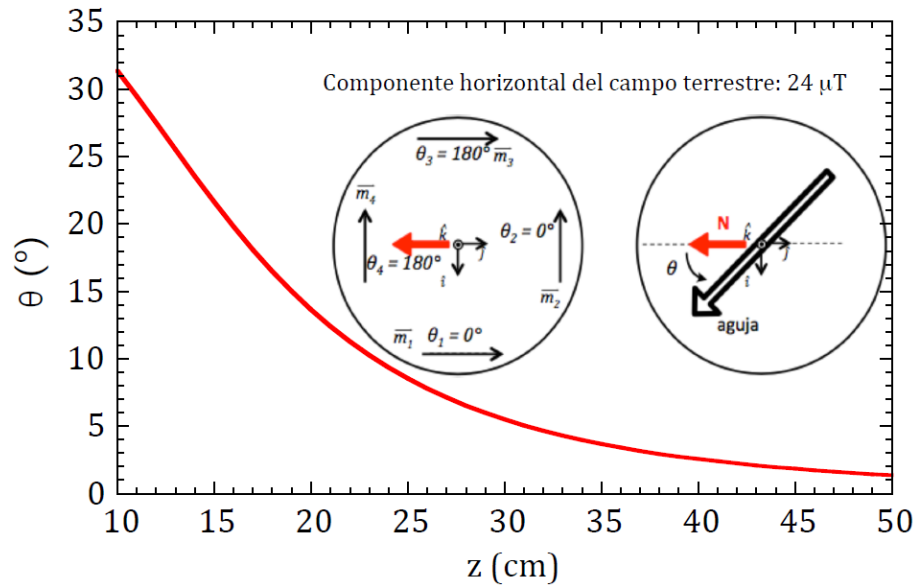


Figura 6.28: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Este (caso de imanes m_1 (0°) m_2 (0°) m_3 (180°) y m_4 (180°)).

Situación 3 condición 2. La presente situación es la que se refiere a la [Figura 6.28](#). Esta situación y condición es idéntica a la [Figura 6.26](#) situación 2 condición 2 de arriba. Los resultados se pueden leer en la [Tabla 5](#) columna 4^a.

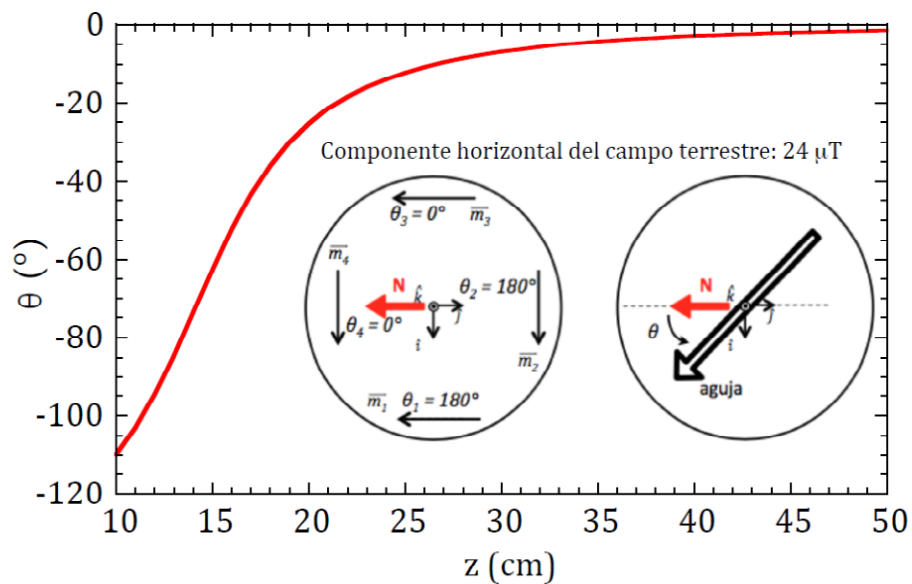


Figura 6.29: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Este (caso de imanes m_1 (180°) m_2 (180°) m_3 (0°) y m_4 (0°)).

Situación 4 condición 1. Se varía la posición de los imanes “activos”, en este caso longitudinales, en la misma dirección que la popa del buque, y los imanes “inactivos” en la misma dirección del campo terrestre. Se puede ver en la [Figura 6.29](#) arriba que es igual que la situación [Figura 6.17](#).

Los resultados se ven en la [Tabla 4](#) columna 5ª.

Situación 4 condición 2. Se deja en la misma posición los imanes longitudinales 2 y 4 con los rojos hacia popa y se varían los imanes transversales de estar con los rojos a estribor a estar con los rojos a babor [Figura 6.30](#). Como se ve claramente diferenciado del caso situación 4 condición 1 la capacidad correctora de los imanes longitudinales, o “activos”, ha disminuido debido a la interacción de los imanes transversales o “inactivos”. Si comparamos la [Figura 6.30](#) con la [Figura 6.20](#), perteneciente a la situación 1 condición 2, se ve que las dos son exactamente iguales y por lo tanto también lo son sus valores de corrección. Los valores se acreditan en la [Tabla 5](#) columna 5ª.

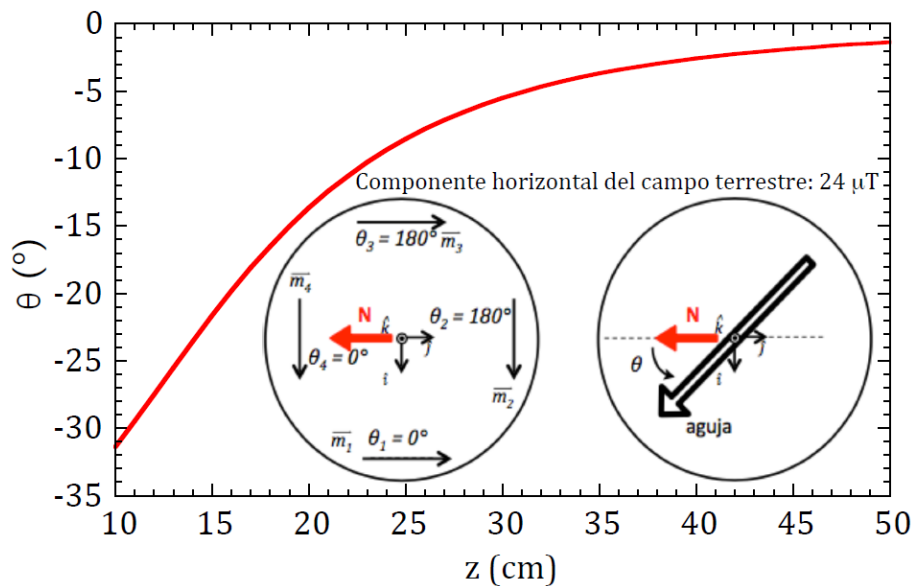


Figura 6.30: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z”. El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Este (caso de imanes m_1 (0°) m_2 (180°) m_3 (180°) y m_4 (0°).

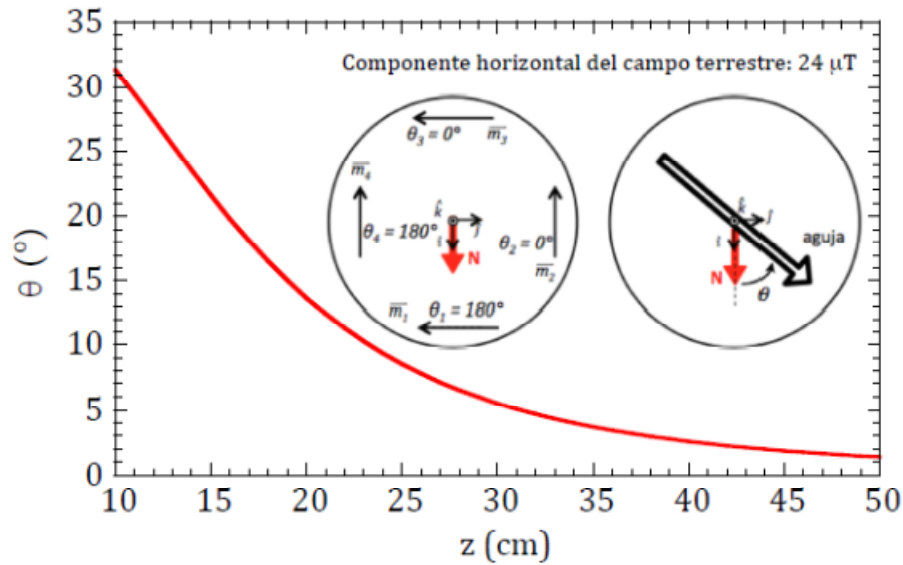


Figura 6.31: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Sur (caso de imanes m_1 (180°) m_2 (0°) m_3 (0°) y m_4 (180°)). Y los

Situación 5 condición 1. Volvemos a realizar un estudio de la disposición de los imanes y la posición del buque respecto al Norte. En la [Figura 6.31](#) se ha dispuesto el vector indicador del campo magnético terrestre direccionando hacia abajo en la página. Aunque se indique de esta manera ese vector siempre indica al Norte con lo que la proa de nuestro buque estará indicando hacia el sur, es decir hemos girado, o borneado otros 90° hacia estribor. Con este cambio también se ha generado un cambio en la actividad de los imanes correctores. Los imanes, que en las situaciones 3 y 4 y condiciones 1 y 2 de cada una de ellas, eran "activos", imanes longitudinales 2 y 4, pasan ahora a ser de nuevo "inactivos" y los "inactivos" 1 y 3 pasan a ser "activos" de nuevo. Por lo tanto en la presente situación y condición tenemos: imanes transversales 1 y 3 "activos", rojos a babor y los imanes longitudinales 2 y 4 "inactivos" rojos a proa.

Si volvemos a repasar las situaciones estudiadas y las comparamos con la presente vemos que la actual es exactamente igual a la de la [Figura 6.26](#). Los valores se ven en la [Tabla 5](#) columna 6^a.

Situación 5 condición 2. En la presente situación hemos variado solo los imanes "inactivos" manteniendo los "activos" en la misma posición que en la anterior Situación 10 condición 1. Si miramos detenidamente las dos figuras [Figura 6.31](#) y [Figura 6.32](#) se ve que en la segunda la corrección conseguida es mayor que la conseguida en la primera figura, debido a algo que ya hemos comentado como es

la influencia de los imanes “inactivos” cuando se colocan en la misma dirección que el campo magnético terrestre.

Los resultados se encuentran en la Tabla 4 columna 6ª siendo en valores absolutos iguales a los de la situación 2 condición 1 representada en la [Figura 6.23](#).

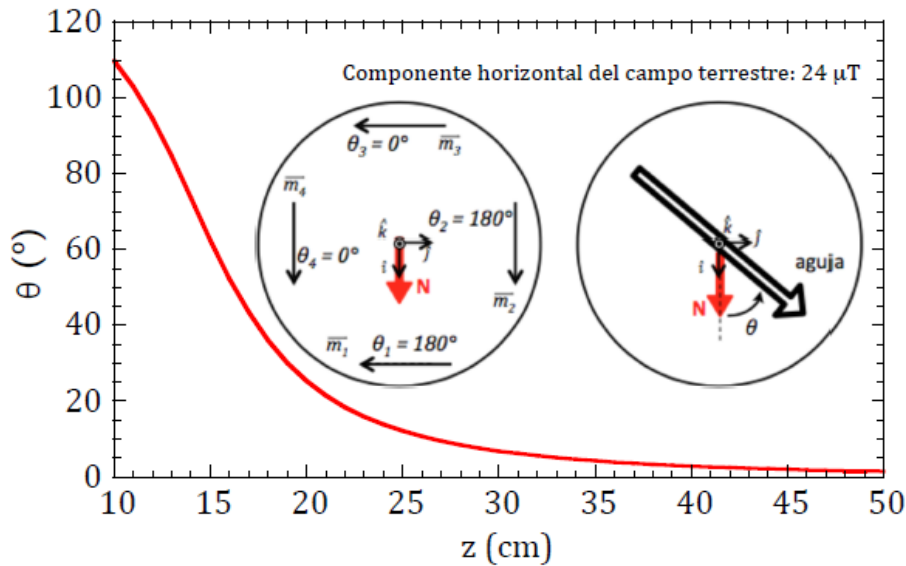


Figura 6.32: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z”. El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Sur (caso de imanes m_1 (180°) m_2 (180°) m_3 (0°) y m_4 (0°)).

Situación 6 condición 1. Los imanes transversales o “activos” se han girado a una posición con los rojos a estribor y los imanes longitudinales o “inactivos” se han posicionado con los rojos a proa. Tenemos en cuenta que aunque los “inactivos” se dirigen hacia proa, en esta ocasión actúan en sentido contrario al campo magnético terrestre, como se ve en la [Figura 6.33](#).

Esta figura es igual que la que representa a la situación [Figura 6.20](#) perteneciente a la situación 2 condición 1 y sus valores de corrección también. La capacidad correctiva se muestra en la Tabla 5 columna 7ª y es la misma en valores absolutos que la [Figura 6.20](#).

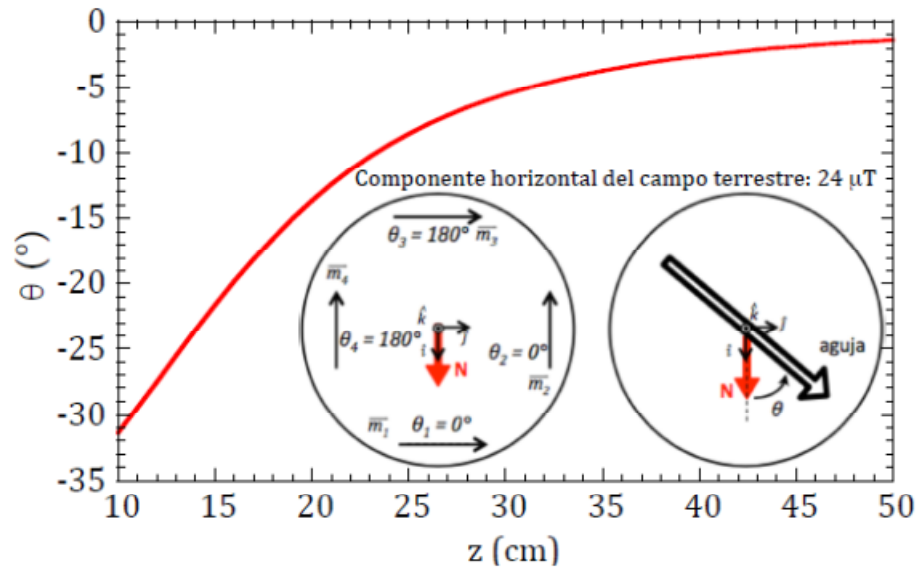


Figura 6.33: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Sur (caso de imanes m_1 (0°) m_2 (0°) m_3 (180°) y m_4 (180°)).

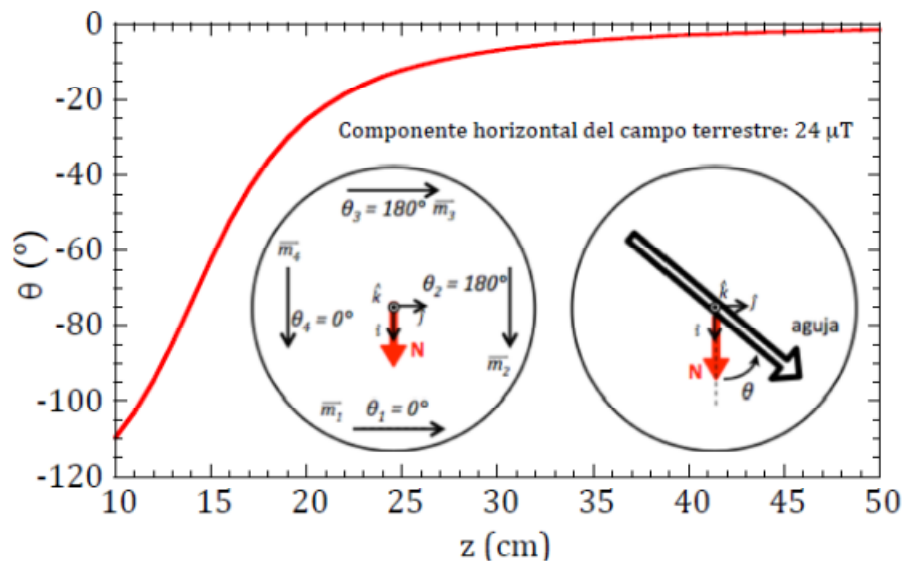


Figura 6.34: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Sur (caso de imanes m_1 (0°) m_2 (180°) m_3 (180°) y m_4 (0°)).

Situación 6 condición 2. Volvemos a casi repetir todo lo que hemos comentado con anterioridad, los imanes "activos" 1 y 3 están situados con el rojo a estribor mientras que los "inactivos" 2 y 4 los hemos girado para ponerlos con el rojo hacia popa. En este caso, y aún sin mirar nada, al estar los imanes "inactivos" en la misma dirección que el campo magnético terrestre, sabemos con seguridad que la corrección conseguida va a ser mayor que en la situación 6 condición 1 anterior.

Así en la [Figura 6.34](#) se ve que para una distancia de unos 20 cm la corrección que se consigue es de aproximadamente unos 22° mientras que en la situación 6 condición 1 es de aproximadamente unos 15° .

Si por otro lado miramos comparativamente las capacidades correctoras de la presente situación se ve que son exactamente iguales que las de la situación 1 condición 1 que corresponde a la [Figura 6.17](#) y los valores de corrección se pueden ver en la [Tabla 4](#) columna 7^a.

Para completar el presente estudio vamos a realizar el análisis de las dos últimas situaciones y sus respectivas condiciones.

Situación 7 condición 1. En la presente volvemos a girar el buque otros 90° hacia estribor con lo que si nos referimos relativamente al Norte magnético lo veremos 90° hacia nuestro estribor, es decir nuestra proa sigue indicando la parte superior de la página con lo que el Norte, si esta 90° por nuestro estribor significa que el Norte estará indicando hacia la derecha de la página.

En esta situación y condición los imanes “activos” volverán a ser los longitudinales 2 y 4 y los “inactivos” los transversales 1 y 3. Así colocamos los imanes longitudinales o “activos” con los rojos hacia proa y los imanes transversales o “inactivos” con los rojos hacia babor. Tal como hemos colocado los imanes los representamos en la [Figura 6.35](#).

Al estar los imanes “inactivos” en sentido contrario al campo terrestre ya sabemos que la capacidad correctora de los imanes “activos” va a ser la mínima.

También lo tenemos reflejado en la [Tabla 5](#) columna 9^a de resultados.

La figura de la presente situación es igual que la de la situación 1 condición 2 representada en la [Figura 6.20](#).

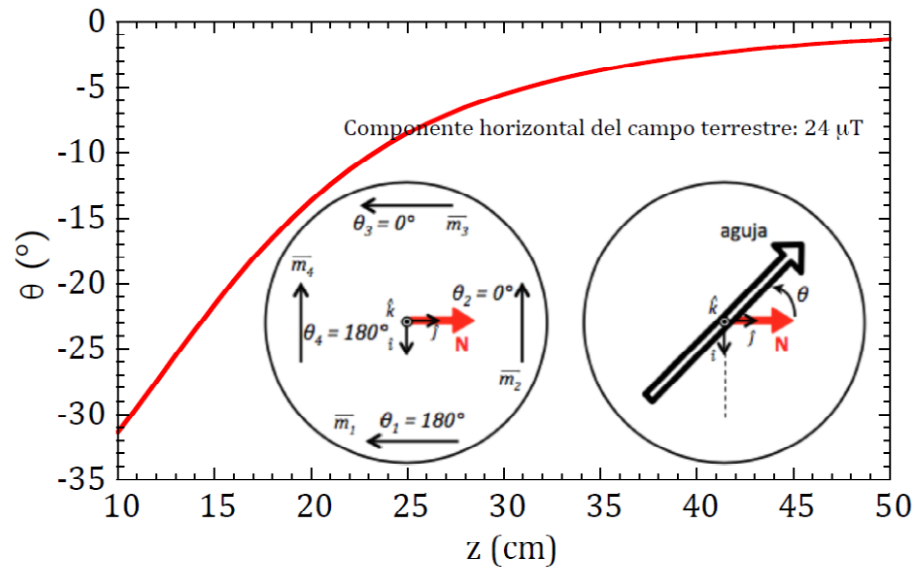


Figura 6.35: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Oeste (caso de imanes m_1 (180°) m_2 (0°) m_3 (0°) y m_4 (180°)).

Situación 7 condición 2. Imanes "activos" 2 y 4 con rojos a proa y los imanes "inactivos" 1 y 3 con los rojos hacia estribor. Configuración ya conocida debido a que se repiten. Configuración representada en la [Figura 6.36](#) y que es similar a la de la situación 1 condición 1 representada por la [Figura 6.17](#).

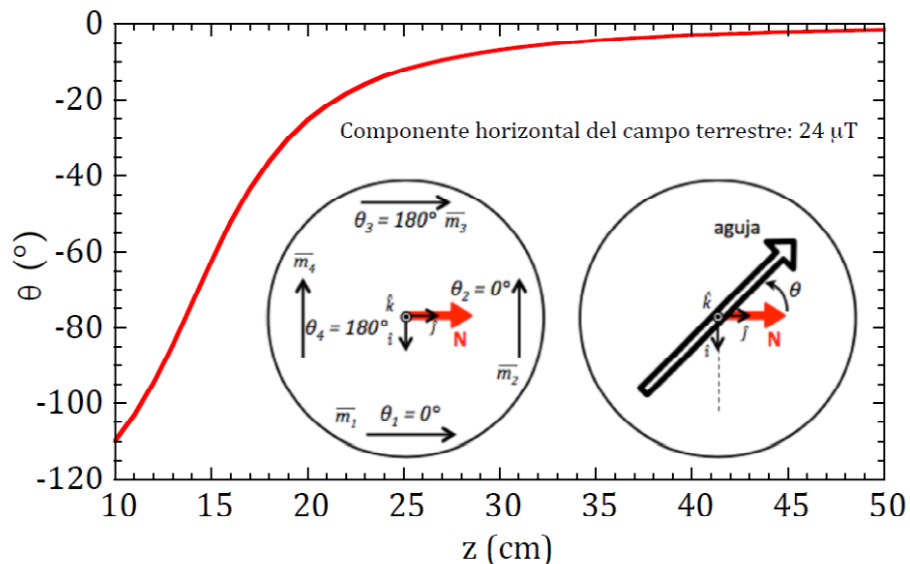


Figura 6.36: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia "z". El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Oeste (caso de imanes m_1 (0°) m_2 (0°) m_3 (180°) y m_4 (180°)).

Ambas figuras y los resultados correspondientes a ellas son similares en capacidad correctora. Esto lo podemos ver en la [Tabla 4](#).

Situación 8 condición 1. Imanes “activos” 2 y 4 con los rojos a popa mientras que los “inactivos” con los rojos babor. En la [Figura 6.37](#) se aprecia la disposición de los diferentes imanes en relación a la aguja magnética y al propio buque.

Al estar los imanes “inactivos” transversales en sentido contrario al campo magnético terrestre la capacidad correctora de los imanes “activos” se ven menguada debido a esta circunstancia. La figura de la presente situación es idéntica a la de la [Figura 6.26](#) perteneciente a la situación 2 condición 2.

Por lo tanto también sus capacidades correctoras son similares como se puede apreciar en la [Tabla 5](#) columna 8ª.

Para finalizar definimos la última **situación 8 condición 2**. Los imanes “activos” siguen siendo los mismos, longitudinales, con los rojos hacia la popa del buque. Los imanes “inactivos”, transversales, los hemos girado hacia el sentido del campo magnético terrestre y quedan con los rojos a estribor.

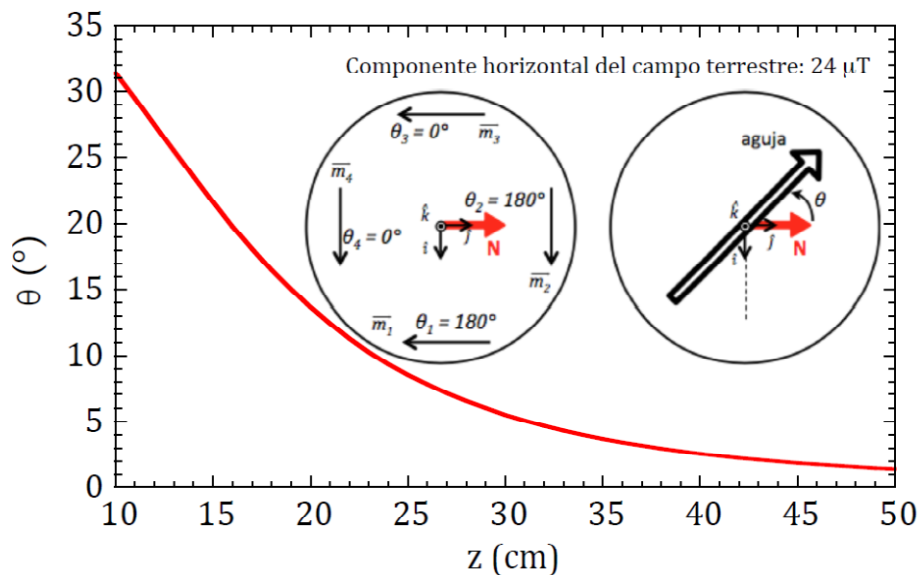


Figura 6.37: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z”. El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Oeste (caso de imanes m_1 (180°) m_2 (180°) m_3 (0°) y m_4 (0°).

En esta situación la capacidad correctora de los imanes correctores, longitudinales, se incrementa debido a confluencia de los imanes “inactivos” transversales con el campo terrestre, como ya se viene repitiendo en toda la discusión de los resultados. Todo lo hemos representado en la [Figura 6.38](#) que comparativamente coincide con la [Figura 6.23](#) perteneciente a la situación 2 condición 1. Sus resultados también son similares como se puede apreciar en la Tabla 4.

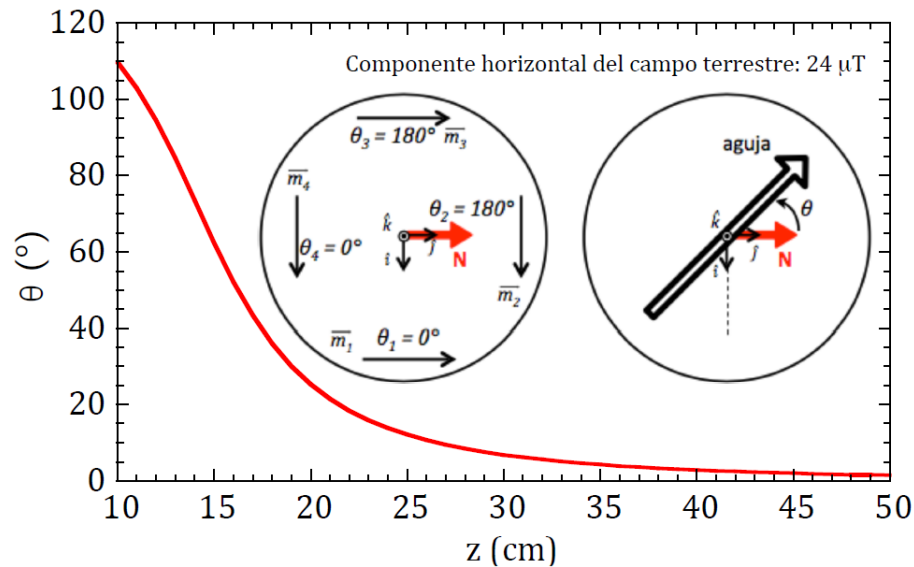


Figura 6.38: Gráfico representando el ángulo de desvío θ en relación a la distancia “z”. El campo terrestre en dirección Norte. La proa del buque la hemos girado hacia el Oeste (caso de imanes m_1 (0°) m_2 (180°) m_3 (180°) y m_4 (0°)).

Como resumen simplemente matizaremos, que al ser cuatro imanes los implicados en la presente investigación, con exactamente la misma capacidad correctiva de imanes “activos” e “inactivos”, las situaciones se repiten cíclicamente a medida que el buque gira y se posiciona en los diferentes rumbos cardinales, permitiendo de esta manera calcular las cuantías que se pueden compensar de los desvíos semicirculares que suelen ser siempre los de mayor cuantía y por lo tanto, los de más interés en corregir.

Todos los resultados surgidos de los cálculos realizados con la fórmula desarrollada para tal fin, se resumen en las tablas que ya hemos ido mencionando a medida que se originaban los resultados, que son la [Tabla 4](#) [Tabla 5](#).

La primera, es la [Tabla 4](#) en el cual hemos anotado los valores de corrección máximos de los imanes “activos” en relación a los distintos rumbos a los cuales se ha efectuado los cálculos.

Para identificar las columnas de la tabla, debido a que los títulos son muy largos los vamos a enumerar e identificar aquí a continuación. Numeraremos las columnas comenzando por la izquierda.

Columna 1ª.- Grados de corrección que se generan a las distintas distancias.

Columna 2ª.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Norte. Imanes correctores Transversales 1 y 3 (activos) rojos orientados hacia estribor. Imanes Longitudinales 2 y 4 (inactivos) rojos hacia proa, orientados en el sentido de la aguja magnética, Norte.

Columna 3ª.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Norte. Imanes correctores Transversales 1 y 3 (activos) rojos orientados hacia babor. Imanes Longitudinales 2 y 4 (inactivos) rojos hacia proa, orientados en el sentido de la aguja magnética, Norte.

Columna 4ª.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Este. Imanes correctores Longitudinales 2 y 4 (activos) rojos orientados hacia proa. Imanes Transversales 1 y 3 (inactivos) rojos hacia babor, orientados en el sentido de la aguja magnética, Norte.

Columna 5ª.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Este. Imanes correctores Longitudinales 2 y 4 (activos) rojos orientados hacia popa. Imanes Transversales 1 y 3 (inactivos) rojos hacia babor, orientados en el sentido de la aguja magnética, Norte.

Columna 6ª.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Sur. Imanes correctores Transversales 1 y 3 (activos) rojos orientados hacia babor. Imanes Longitudinales 2 y 4 (inactivos) rojos hacia popa, orientados en el sentido de la aguja magnética, Norte.

Columna 7ª.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Sur. Imanes correctores Transversales 1 y 3 (activos) rojos orientados hacia estribor. Imanes Longitudinales 2 y 4 (inactivos) rojos hacia popa orientados en el sentido de la aguja magnética, Norte.

Columna 8ª.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Oeste. Imanes correctores Longitudinales 2 y 4 (activos) rojos orientados hacia popa. Imanes Transversales 1

y 3 (inactivos) rojos hacia estribor, orientados en el sentido de la aguja magnética, Norte.

Columna 9^a.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Oeste. Imanes correctores Longitudinales 2 y 4 (activos) rojos orientados hacia proa. Imanes Transversales 1 y 3 (inactivos) rojos hacia estribor, orientados en el sentido de la aguja magnética, Norte.

Tabla 4: Resultados teóricos de corrección máxima.

Grados de corrección θ	$i1-i3 E, i2-i4 N$ d	$i1-i3 W, i2-i4 N$ d	$i1-i3 N, i2-i4 E$ d	$i1-i3 N, i2-i4 W$ d	$i1-i3 E, i2-i4 N$ d	$i1-i3 W, i2-i4 N$ d	$i1-i3 N, i2-i4 E$ d	$i1-i3 N, i2-i4 W$ d
1	53,4	53,4	53,4	53,4	53,4	53,4	53,4	53,4
2	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6
3	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4
4	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7
5	33,2	33,2	33,2	33,2	33,2	33,2	33,2	33,2
6	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3
7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7
8	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5	28,5
9	27,4	27,4	27,4	27,4	27,4	27,4	27,4	27,4
10	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5
11	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8
12	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1
13	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5
14	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9
15	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4
16	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
17	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5
18	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1
19	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8
20	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5
21	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1
22	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9
23	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6
24	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3
25	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1
26	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8
27	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6
28	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4
29	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2	19,2
30	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0
31	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8
32	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6
33	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
34	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3
35	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2
36	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
37	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8	17,8
38	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7
39	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6
40	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4

La segunda la [Tabla 5](#), por el contrario, nos indica los valores de corrección mínimos de los imanes “activos”. Para identificar las columnas, al igual que en la tabla anterior, debido a que los títulos pueden ser muy largos los vamos a enumerar e identificar aquí abajo. Comenzaremos por la columna de la izquierda.

Columna 1^a.- Grados de corrección que se generan a las distintas distancias.

Columna 2^a.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Norte. Imanes correctores Transversales 1 y 3 (activos) rojos orientados hacia estribor. Imanes Longitudinales 2 y 4 (inactivos) rojos hacia popa, orientados en sentido contrario de la aguja magnética, Sur.

Columna 3^a.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Norte. Imanes correctores Transversales 1 y 3 (activos) rojos orientados hacia babor. Imanes Longitudinales 2 y 4 (inactivos) rojos hacia popa, orientados en sentido contrario de la aguja magnética, Sur.

Columna 4^a.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Este. Imanes correctores Longitudinales 2 y 4 (activos) rojos orientados hacia proa. Imanes Transversales 1 y 3 (inactivos) rojos hacia estribor, orientados en sentido contrario de la aguja magnética, Sur.

Columna 5^a.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Este. Imanes correctores Longitudinales 2 y 4 (activos) rojos orientados hacia popa. Imanes Transversales 1 y 3 (inactivos) rojos hacia estribor, orientados en sentido contrario de la aguja magnética, Sur.

Columna 6^a.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Sur. Imanes correctores Transversales 1 y 3 (activos) rojos orientados hacia babor. Imanes Longitudinales 2 y 4 (inactivos) rojos hacia proa, orientados en sentido contrario de la aguja magnética, Sur.

Columna 7^a.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Sur. Imanes correctores Transversales 1 y 3 (activos) rojos orientados hacia estribor. Imanes Longitudinales 2 y 4 (inactivos) rojos hacia proa, orientados en sentido contrario de la aguja magnética, Sur.

Columna 8ª.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Oeste. Imanes correctores Longitudinales 2 y 4 (activos) rojos orientados hacia popa. Imanes Transversales 1 y 3 (inactivos) rojos hacia babor, orientados en sentido contrario de la aguja magnética, Sur.

Columna 9ª.- Aguja hacia el Norte. Buque con proa al Oeste. Imanes correctores Longitudinales 2 y 4 (activos) rojos orientados hacia proa. Imanes Transversales 1 y 3 (inactivos) rojos hacia babor, orientados en sentido contrario de la aguja magnética, Sur.

Tabla 5: Resultados teóricos de corrección mínima.

Grados de corrección ϑ	$i1-i3 E, i2-i4 S$ d	$i1-i3 W, i2-i4 S$ d	$i1-i3 S, i2-i4 E$ d	$i1-i3 S, i2-i4 W$ d	$i1-i3 E, i2-i4 S$ d	$i1-i3 W, i2-i4 S$ d	$i1-i3 S, i2-i4 E$ d	$i1-i3 S, i2-i4 W$ d
1	54,1	54,1	54,1	54,1	54,1	54,1	54,1	54,1
2	43,7	43,7	43,7	43,7	43,7	43,7	43,7	43,7
3	37,8	37,8	37,8	37,8	37,8	37,8	37,8	37,8
4	33,9	33,9	33,9	33,9	33,9	33,9	33,9	33,9
5	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1
6	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
7	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2
8	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7
9	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4	24,4
10	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3
11	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3	22,3
12	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4
13	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5
14	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7
15	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0
16	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3
17	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7
18	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1
19	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5
20	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9
21	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3
22	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8
23	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
24	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8
25	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3
26	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8
27	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3
28	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7
29	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
30	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7
31	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
32	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7
33	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
34	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6
35	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1
36	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
37	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
38	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
39	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
40	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4

Con estas [Tabla 4](#) y [Tabla 5](#), resúmenes, concluimos la fase algorítmica que hemos desarrollado a partir de una fórmula simple del campo generado por un dipolo puntual.

Contra estos resultados, vamos a proceder a situar el plato con los imanes en las diferentes posiciones emanadas del cálculo y probar que dichos cálculos son correctos, teniendo en cuenta siempre un pequeño grado de error que pueda ser debido a la medición de la distancia correcta entre los imanes y el punto de medición y al error que se hubiera podido generar al realizar la medición del momento magnético de los imanes correctores. De esta manera no intentaremos argumentar que debido a errores externos no den exactamente los mismos resultados que el calculado matemáticamente.

Del total de valores teóricos calculados en laboratorio, y que se muestran en las dos tablas anteriores, solo podemos utilizar los valores que hemos coloreado en las tablas correspondientes debido a que el rango de nuestro trabajo fluctúa entre 15,8 cm y 35.4 cm de distancia.

Como los gráficos de mediciones de los valores obtenidos en las diferentes situaciones y condiciones, han sido incluidos en los diferentes apartados de este mismo capítulo, únicamente añadiremos a continuación para su análisis y posterior estudio, las dos tablas correspondientes a los valores, fruto de las mediciones comparativas entre la teoría y la práctica, en función del posicionamiento de los imanes inactivos.

La [Tabla 6](#) y [Tabla 7](#) que aparecen a continuación muestran los resultados prácticos reales medidos en la pseudo-bitácora con el prototipo colocado en el mismo.

La definición de las columnas es la misma que la realizada para la [Tabla 4](#) y [Tabla 5](#) con la salvedad de que en las primeras 6 y 7 aparece una columna adicional "DISTANCIA" que nos muestra la distancia a la que se han efectuado las mediciones siendo la primera columna el resultado teórico de la corrección a dicha distancia y el resto las correcciones producidas a esas misma distancias habiendo colocado la pseudo-bitácora y los imanes compensadores en las posiciones correspondientes.

Tabla 6: Resultados prácticos de corrección máxima

Grados de corrección ϑ	$i1-i3 E, i2-i4 N$ θ	$i1-i3 W, i2-i4 N$ θ	$i1-i3 N, i2-i4 E$ θ	$i1-i3 N, i2-i4 W$ θ	$i1-i3 E, i2-i4 N$ θ	$i1-i3 W, i2-i4 N$ θ	$i1-i3 N, i2-i4 E$ θ	$i1-i3 N, i2-i4 W$ θ	DISTANCIA
4	4,1	4,2	4,2	4,3	4,1	4,1	4,2	4,1	33,9
5	4,6	4,7	4,5	4,6	4,6	4,5	4,7	4,6	33,2
6	5,4	5,6	5,5	5,5	5,7	5,3	5,7	5,6	31,3
7	6,8	6,9	6,7	6,8	6,8	6,7	6,9	6,7	29,7
8	7,9	7,6	7,9	7,8	7,7	7,8	7,9	7,8	28,5
9	9,0	8,9	8,8	8,8	9,0	8,9	8,7	8,7	27,4
10	9,8	9,8	9,9	9,7	9,8	9,8	9,7	9,9	26,5
11	10,9	10,8	10,9	10,9	10,7	10,8	10,7	10,8	25,8
12	11,8	11,8	11,9	11,9	11,7	11,9	11,8	11,8	25,1
13	12,8	12,7	12,7	12,6	12,8	12,7	12,9	12,8	24,5
14	13,9	14,0	13,8	13,6	13,9	13,8	13,9	13,9	23,9
15	14,9	14,8	14,7	15,0	14,0	14,8	14,9	14,8	23,4
16	16,0	16,1	15,9	15,9	15,8	15,9	15,8	16,0	23,0
17	17,1	16,0	16,9	17,0	16,9	16,8	16,9	16,8	22,5
18	17,9	18,0	18,0	18,1	17,9	17,8	18,0	18,0	22,1
19	19,1	19,0	18,9	18,9	19,0	19,1	19,0	19,0	21,8
20	20,1	20,2	20,2	20,1	20,1	20,0	20,1	20,0	21,5
21	21,1	21,1	21,0	21,0	21,1	19,9	19,9	20,1	21,1
22	22,0	22,1	22,0	21,9	22,1	22,2	22,3	22,0	20,9
23	23,2	23,0	23,1	23,1	23,2	23,3	23,1	23,1	20,6
24	24,0	24,2	24,3	24,1	24,2	24,1	24,2	24,1	20,3
25	25,2	25,2	25,1	25,3	25,3	25,2	25,3	25,1	20,1
26	26,2	26,1	26,2	26,1	26,0	26,1	26,0	26,1	19,8
27	27,2	27,1	27,1	27,3	27,1	27,2	27,3	27,1	19,6
28	28,1	28,1	28,0	28,2	28,1	28,0	28,1	28,2	19,4
29	29,0	29,1	29,2	29,1	29,0	29,2	29,1	29,0	19,2
30	30,2	30,2	30,1	30,0	30,1	30,2	30,1	30,2	19,0
31	31,2	31,2	31,3	31,0	31,1	31,2	31,3	31,2	18,8
32	32,2	32,1	32,0	32,1	32,1	32,0	32,1	32,2	18,6
33	33,0	33,2	33,2	33,1	33,2	33,0	33,1	33,0	18,5
34	34,1	34,0	34,1	34,0	33,9	34,1	34,2	34,1	18,3
35	35,0	35,0	35,1	35,1	35,0	35,1	35,0	35,1	18,2
36	36,1	36,0	36,1	36,2	36,1	36,1	36,0	36,2	18,0
37	37,2	37,1	37,0	37,1	37,1	37,2	37,0	37,1	17,8
38	38,1	38,0	38,1	38,2	38,1	38,0	38,0	38,2	17,7
39	39,0	39,1	39,1	39,2	39,0	39,2	39,1	39,1	17,6
40	40,3	40,2	40,2	40,3	40,2	40,3	40,1	40,2	17,4

Tabla 7: Resultados prácticos de corrección mínima

Grados de corrección ϑ	$i1-i3 E, i2-i4 S$ θ	$i1-i3 W, i2-i4 S$ θ	$i1-i3 S, i2-i4 E$ θ	$i1-i3 S, i2-i4 W$ θ	$i1-i3 E, i2-i4 S$ θ	$i1-i3 W, i2-i4 S$ θ	$i1-i3 S, i2-i4 E$ θ	$i1-i3 S, i2-i4 W$ θ	DISTANCIA
4	4,0	4,1	3,9	4,1	4,0	3,9	3,8	3,9	33,9
5	5,1	5,1	5,0	4,9	5,1	4,8	4,9	4,9	31,1
6	6,0	5,9	5,9	6,1	6,0	5,8	5,9	5,8	29,0
7	6,9	6,8	6,9	6,9	7,0	6,9	7,0	6,8	27,2
8	7,8	7,9	7,9	7,9	7,8	8,0	7,8	7,9	25,7
9	8,9	8,8	8,8	8,9	8,7	8,9	8,8	8,7	24,4
10	9,8	9,8	9,7	9,7	9,7	9,9	9,8	9,9	23,3
11	10,9	10,8	10,9	10,8	10,7	10,9	11,0	10,8	22,3
12	11,8	11,8	11,7	11,7	11,9	11,8	11,8	11,9	21,4
13	12,9	12,9	12,7	13,0	12,8	13,0	12,9	12,9	20,5
14	13,7	13,6	13,8	13,9	13,7	13,8	14,0	13,8	19,7
15	14,8	14,8	14,7	14,9	14,7	15,0	14,8	14,9	19,0
16	15,8	16,0	15,9	15,7	15,7	15,9	15,9	15,8	18,3
17	16,8	16,8	16,9	17,0	16,8	16,9	17,0	16,8	17,7
18	18,0	17,9	17,7	18,0	17,9	17,8	17,8	17,9	17,1
19	19,0	19,1	18,9	18,9	18,7	18,9	18,9	18,7	16,5
20	19,9	20,0	19,8	19,7	20,1	19,9	19,9	18,7	15,9

Solo hemos computado valores que vamos a poder utilizar en nuestro prototipo debido a su ámbito de trabajo. Por eso que en las tablas ultimas, de resultados teóricos aparezcan menos distancias que en las tablas de valores teóricos.

Una vez llegados a este punto interesa decir que los imanes utilizados en la experiencia fueron medidos unitariamente para comprobar la igualdad del momento magnético de cada uno de ellos. Especificaremos que el momento magnético de los imanes utilizados es de $0,38 \text{ Am}^2$ como se define en el capítulo relativo al mismo.

Es importante también anotar las diferencias entre los valores calculados y los valores obtenidos de la medición real, ya que únicamente han presentado una variación de 0,3 décimas de grado de corrección, con lo que se podría afirmar, que teniendo en cuenta el rango de valores en el ámbito que los marinos utilizamos en

el proceso de compensación es muy válido el resultado, pudiendo decir que casi milimétrico.

De los presentes resultados obtenidos deducimos que los cuatro imanes actúan con una capacidad de corrección igual para los dos pares diferenciados.

Que sea la distancia que sea, las correcciones generadas serán iguales para todos los desvíos existentes a bordo. Por lo tanto, sabiendo que los desvíos a bordo de un buque son distintos en la medida que el buque gobierna a distintos rumbos, la compensación que generan los distintos pares de imanes serán iguales a cualquier rumbo.

Tendremos que, de alguna manera, poder ajustar las compensaciones a distintos rumbos con esos mismos imanes compensadores. Esto lo vamos a conseguir primeramente compensando el desvío más grande que tengamos a su rumbo. Luego con la propiedad que se había comentado al principio del estudio de que la capacidad correctora de un par de imanes se puede ajustar girando uno de sus componentes hasta una situación en la que el par conforme la compensación deseada, desde un máximo, cuando la pareja de imanes correctores están paralelos y en el mismo sentido, hasta una mínima de cero cuando la pareja esté en la misma dirección pero en sentidos contrarios.

Con esto queda claro que con el mismo plato podremos compensar cualquier cuantía de desvíos que aparezcan correspondientes a los desvíos semicirculares.

Hay que tener en cuenta la cuantía de corrección en condiciones normales de la pareja de imanes compensadores para realizar el cálculo de giro para ajustar su valor al deseado.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

7.1.- Conclusiones

La colocación de los imanes en un plato nos ha ofrecido un mejor control de la capacidad correctora de los mismos, respecto al sistema estándar que únicamente nos permitía una compensación aproximada y a tanteo, obligándonos a realizar una combinación de distintos imanes y tamaños para poder corregir un determinado desvío.

La capacidad de corrección que se genera con el nuevo sistema, es mucho más versátil, para nuestras necesidades, debido al desplazamiento vertical del plato y la posibilidad de giro de los imanes correctores en el mismo

La mínima distancia, de actuación de los imanes compensadores, que se estipula en los sistemas convencionales es de aproximadamente el triple de la longitud de los imanes que se utilizan en la compensación. En vista de los resultados obtenidos podríamos aconsejar que fuera, de al menos, cuatro veces la longitud de los mismos debido a que a distancias inferiores un movimiento mínimo en distancia afecta muy sensiblemente a la capacidad de compensación del sistema. Esto último ya ha sido comentado por distintos investigadores de la compensación, recomendando realizar la misma, utilizando mayor número de imanes y más alejados de la aguja magnética, para poder de esta manera generar un campo magnético más homogéneo alrededor del compás magnético.

De esta manera definimos las siguientes conclusiones:

PRIMERA.- Una estructura como la fabricada en este prototipo, nos ha ofrecido la posibilidad de corrección de aprox. 40 grados de desvío como máximo, únicamente regulando el plato, en altura. Además de un mayor afinamiento en los valores, aprovechando espacios intermedios, al no estar basado en celdas ya preestablecidas, para los imanes longitudinales y transversales.

Hay que tener en cuenta una premisa. Que primero habrá que compensar los desvíos semicirculares, hacia el Este y Oeste, por tratarse de los valores máximos, para luego ajustar los correspondientes a semicirculares, hacia el Norte y Sur, normalmente de menor valor que los anteriores.

SEGUNDA.- Debido a la capacidad de giro de los imanes correctores tanto longitudinales como transversales, además de ser capaz de compensar cualquier cantidad de desvío semicircular, (siendo, los más significativos, como hemos comentado en la primera conclusión), también se consigue indirectamente incidencia en los desvíos cuadrantales al interactuar todos sobre un mismo plano horizontal, reduciendo considerablemente el número de imanes correctores, al utilizarse solamente cuatro unidades.

TERCERA.- Se ha desarrollado una fórmula mediante la cual, conociendo el momento magnético de un imán corrector, se obtienen con exactitud las distancias a las que colocar el plato para obtener una determinada corrección. Esta capacidad de corrección difiere completamente de la obtenida en función de una potencia absoluta o relativa de los mismos, tal y como se ha venido y se viene realizando en la actualidad.

CUARTA.- Como consecuencia de la fórmula desarrollada en el punto tercero de los objetivos se ha corroborado la veracidad de los resultados, contrastando los obtenidos de manera empírica y los obtenidos en laboratorio con los algoritmos desarrollados. El nuevo sistema cumple con su finalidad compensadora.

Como curiosidad y de una forma sorpresiva, apareció una última e inesperada conclusión...

QUINTA.- Realizando el estudio de los resultados obtenidos y su discusión, se ha constatado que la capacidad compensadora de los imanes "activos" se ve directamente afectada por el posicionamiento relativo de los imanes "inactivos". En el capítulo correspondiente, los resultados dan debida cuenta de dicha afección. A fecha de hoy no se tiene constancia escrita, como tampoco en la práctica profesional, de esa diferencia de capacidades correctoras según la incidencia o afección de los imanes "inactivos".

Esta observación contradice directamente con la manera de comprobación, que se ha realizado y se realiza, aún en la actualidad, donde se calcula la Pr (potencia relativa) de un imán colocándolo en la casilla 1 de la bitácora y mirando su capacidad correctora.

Según lo observado en los resultados de esta tesis el valor obtenido de esa Pr se verá modificado por efecto de los otros imanes compensadores que se vayan a

colocar conjuntamente en la bitácora, siendo erróneo el cálculo realizado para cada imán, y por tanto su corrección, debido a que dicha P_r se verá afectada por la interacción con resto de los imanes duros posicionados en la bitácora.

7.2.- Futuras investigaciones

Habiendo realizado el mayor porcentaje de las pruebas, tanto de trabajo de campo, como las empíricas con material (compás satelital, compases magnéticos, sensores, CMIcompass, imanes correctores, etc.) provenientes de proyectos anteriores, como la tesis doctoral del director de la presente, dos proyectos de investigación de dos años cada uno, con unos presupuestos más que aceptables, una patente nacional, europea y estadounidense; y Licenciada la misma a la empresa Autonautic Instrumental (fabricantes de compases magnéticos) de Barcelona, así como el Trabajo Fin de Master de Nikolas Ramsden, también bajo la misma dirección comprobamos, que los algoritmos teóricos desarrollados para la compensación por medio del cálculo de momentos magnéticos utilizados en sustitución de las potencias absolutas y relativas de los imanes correctores, eran satisfactorios.

Todas las numerosas pruebas de laboratorio han sido realizadas bajo la supervisión y "auspicio" del compañero y Amigo de la UPV/EHU Alfredo García Arribas, Doctor en Física, especialidad en Física del Estado Sólido; y los programas informáticos, en el CMI, desarrollados a la perfección según las exigencias por parte del Ingeniero Técnico en Informática de Gestión y también Amigo Ricardo López de la empresa Ritmas Informáticas (ya citada con anterioridad).

Nos quedaría como ampliación del presente trabajo:

Realización de pruebas con los mismos equipos a diferentes situaciones y condiciones:

A) Con cuatro imanes cardinales únicamente, compensación de los desvíos cuadrantales que se producen a los rumbos cuadrantales NE, SE, SW y NW.

B) Con cuatro imanes para obtener los valores a nueve situaciones y dos condiciones por situación cada una de ellas a ocho rumbos en vez de a cuatro como hemos venido realizando hasta ahora.

C) Con ocho imanes, manteniendo cuatro cardinales fijos y añadiendo otros cuatro cuadrantales.

D) Con ocho imanes, cuatro cardinales y cuatro cuadrantales en distintos posicionamientos para correcciones a máximos y mínimos.

y así, poder determinar, únicamente colocando el plato a una altura determinada, realizando los ajustes necesarios de giros etc., y conociendo los valores a nivel teórico, en conjunción con el CMI, poder realizar una compensación completa sin tener que añadir, suprimir y ni tan siquiera sustituir imanes, a como se viene realizando actualmente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ACZEL, A.D. (2001). *The riddle of the Compass*. New York.
- [2] AIRY, G.B. (1840). On the Correction of the Compass in Iron-built Ships. *United Service Magazine*, 33, 239-241.
- [3] — (1896). *Autobiography of Sir George Biddell Airy*. Wilfrid A. (ed.) Cambridge, University Press, Inglaterra.
- [4] ANDRADE, E. N. DA C. (1958). The Early History of the Permanent Magnet. *Endeavours*, 17 (65), 22-30, Disponible en:
<http://www.askmar.com/Magnets/Permanent%20Magnet%20Early%20History.pdf>
- [5] ANNEX I es una versión editada del informe nº 2003-0240 del Det Norske Veritas, Tabla 4-1, (columnas, Technical Systems, y Other), p. 8, Disponible en:
http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCQOFjAA&url=http%3A%2F%2Fresearch.dnv.com%2Fskj%2FFSALP%2FANNEXI.pdf&ei=FjffVPCCPMTIUougqAB&usg=AFQjCNGRf98DPL3Eg1YcslYQEpV6OU_E4Q&bvm=bv.85970519,d.d24&cad=rja
- [6] ANSON, G. (1911). *A voyage Round the World*. Londres: Publicado por Dent, J. M. (pub.), pp. 384. con mapas de 18 cm.
- [7] BAKER, S.J. (1962). *My own destroyer: A Biography of Capt. Matthew Flinders, Explorer and Navigator*. Editorial: Currawong Publishing Co., Sydney, Australia.
- [8] BARBAZAN, E. (ed.) (1808). *Fabliaux et contes des poètes françois des XI, XII, XIII, XIV et XV^e siècles, tirés des meilleurs auteurs*, Nueva edición, aumentado y revisado sobre los manuscritos de la Biblioteca imperial, por M. Méon, Paris, Warée, 3 t., xxii + 465, xiv + 467, xxxii + 514 p. (ici t. 2, p. 327-328). Disponible en:

https://books.google.es/books?id=kD0JAAAAQAAJ&pg=PA307&lpg=PA307&dq=Guiot+de+Provins+la+Bible&source=bl&ots=SYUut1Vsil&sig=iFG_JRAtuHthCHSgS3NZ5zXMtk&hl=es&sa=X&ei=3u_tVIWIMMX3UuuegegN&ved=0CDwQ6AEwAw#v=onepage&q=Guiot%20de%20Provins%20a%20Bible&f=false

[9] BARLOW, W. (1597). *The navigators supply: Containing many things of principall importance belonging to navigation, with the description and use of diverse instruments framed chiefly for that purpose : but serving also for sundry other of cosmography in generall : the particular instruments are specified on the next page.* (6^a ed.) London: G. Bishop, R. Newbery and R. Barker, pp.50.

[10] — (1616). *Magnetical Advertisements, or diverse pertinent observations and approved experiments, concerning the nature and property of the Loadstone.* Londres: nueva edición de William Sturgeon. pp. 78. Disponible en:

<https://books.google.es/books?id=Sx9WAAAACAAJ&pg=PR7&lpg=PR7&dq=william+barlow+:magneticall+advertisements&source=bl&ots=M60ExlrN1&sig=PrKQPrEQgNEz0fF5itkBKisDCNE&hl=es&sa=X&ei=UtsaVcCAGYK5UYHCgPAO&ved=0CFAO6AEwCQ#v=onepage&q=william%20barlow%20%3Amagneticall%20advertisements&f=false>

[11] BARNABY, K.C. (1968). *Some Ship Disasters and Their Causes.* Hutchinson: Londres. pp. 272.

[12] BENJAMIN, A. E. (2005). *On Their Own Terms: Science in China, 1550-1600.* Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England. pp. 567.

[13] BERNARD, W.D. (1844). *Narrative of the Voyages and Services of the Nemesis, from 1840 to 1843; and of the combined naval and military operations in China: comprising a complete account of the colony of Hong-Kong, and remarks on the character and habits of the Chinese., 2 Vol.,* Londres.

[14] BOROUGH, W. (1581). *A Discourse of the Variation of the Compass or Magnetized Needle.* Ballard, Londres: Colburn, H. pp. 60.

[15] BROMEHEAD, C. E. N. (1945). Alexander Neckam on the Compass Needle. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 50 (2), 139-140.

[16] — (1948). Ships' Loadstones. *Mineralogical Magazine*, 28 (203), 429-437.

DOI: [10.1180/minmag.1948.028.203.04](https://doi.org/10.1180/minmag.1948.028.203.04)

-
- [17] BULLARD, E., GELLMAN, H. (1954). Homogeneous Dynamos and Terrestrial Magnetism. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 247, No. 928, pp. 213-278. Disponible en:
- http://courses.seas.harvard.edu/climate/eli/Courses/EPS281r/Sources/Earth-dynamo/more/Bullard_Gellman_1954.pdf
- [18] BURBANO, S., BURBANO, E., Y GRACIA, C. (2003). *Física General*. (32ª ed.) Madrid: Editorial Tébar, 800.
- [19] CARLSON, J.B. (1975). Lodestone Compass: Chinese or Olmec Primacy? Multidisciplinary analysis of an Olmec hematite artifact from San Lorenzo, Veracruz, Mexico. *Science, New Series*, 189 (4205), 753-760.
- DOI 10.1126/science. 189.4205.753
- [20] CATALÁ, J. (1972). *Física General*. (5ª ed.), Valencia: Ed. Saber, 920.
- [21] CHALMERS, J. (1891). China and the magnetic compass. *The China Review*, 19, 52.
- [22] CHAPMAN, S., Y BARTELS, J. (1940). *Geomagnetism*; Oxford University Press; London; 2 Vol., Chp. XX, pp. 684-698.
- [23] CHATLAY, H. (1917). Feng-Shui. *The Encyclopaedia Sinica*, Couling, S. (ed.). Shanghai: Kelly and Walsh, p. 175.
- [24] CHEN-TO, W. (1949). Ssu-nan, Cheh-nan Tchen yu Lo-king-p'an, Ch 3, Aiguille montre-sud, *Chinese Journal of Archaeology*, no. 4. Institute of History and Philology, Academia Sinica.
- [25] COEY, J.M.D., (ed.) (1996) *Rare Earth Permanent Magnets*. Clarendon Press, Oxford UK., pp. 522.
- [26] COTTER, C. H. (1976). George Biddell Airy and his Mechanical Correction of the Magnetic Compass. *Annals of Science*, 34, 263-274.
- [27] — (1977). The Early History of Ship Magnetism: The Airy-Scoresby Controversy. *Annals of Science*, 34, 589-599.
- [28] CREAK, E.W. (1889). On the Mariner's Compass in Modern Vessels of War. *British Royal United Services Institution*, 33 (150), 949-975.
- DOI: 10.1080/03071848909418092.

- [29] CREAK, W. H. (1920). The History of the Liquid Compass. *The Geographical Journal*, 56 (3), 238-239.
- [30] CREUZE, A.F.B. (1840). On the *Nemesis* Privetely Armed Steamer, and on the Comparative Efficiency of Iron-Built and Timber-Built Ships. *United Services Journal*. 90-100.
- [31] CRUZ, E. (2011). El GPS puede funcionar mal. *Recalada: Revista de divulgación marítima*, (123), 6-7.
- [32] DALLABELLA, G.A. (1797). Memórias sobre a Força Magnética. *Memorias da Academia Real das Sciencias de Lisboa*, 1 y 2, 85-199.
- [33] DAUJAT, J. (1949). Origines et Formation de la Théorie des Phénomènes Électriques et Magnétiques., *Actualités Scientifiques et Industrielles Exposés d'Histoire et Philosophie des Sciences*, Paris: Hermann, 11, 529. ISSN 1961-8158.
- [34] DELGADO, R. (1990). *Magnetometría*. ed. La Habana: Pueblo y Educación, 339.
- [35] DUYVENDAK, J.J.L. (1938). Sailing directions of Chinese voyages. *T'oung Pao*, 34, 230-237.
- [36] EDKINS J. (1877). Chinese Names for Boats and Boat Gear; with Remarks on the Chinese Use of the Mariner's Compass. *Journal Royal Asiatic Society/ North China Branch*; 11, 123-142.
- [37] ELSASSER, W.M. (1946). Induction Effects in Terrestrial Magnetism. Part I Theory. *Physical Review*, 69, 106-116.
- [38] ELSASSER, W.M. (1946). Induction Effects in Terrestrial Magnetism. Part II The Secular Variation. *Physical Review*, 70, 202-212.
- [39] EVANS, F.J.O. (1859). Notes of the Magnetism of Ships. *Royal United Services Institution Journal*, 3 (1), 91-110.
- DOI: 10.1080/03071845909422972
- [40] — (1865). On the Magnetism of Iron and Iron-Clad Ships. *Royal United Services Institution Journal*, 9, 277-298.
- DOI:10.1080/03071846509417190

- [41] FAA, (Federal Aviation Administration) (1999). Press Release – Risks To GPS Signal Can Be Managed, Independent Assessment Concludes, Release No. APA 20-99, January 29. Disponible en:
- http://www.faa.gov/news/press_releases/news_story.cfm?newsId=4931
- [42] FLINDERS M. (1805). Concerning the Difference in the Magnetic Needle on Board the Investigator, arising from an Alteration in the Direction of the Ship's Head. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95, 186-197. DOI: 10.1098/rstl.1805.0012
- [43] – (1812). Magnetism of Ships. *Naval Chronicle*, 28, 318-324.
- [44] – (1814).; A Voyage to Terra Australis undertaken for the purpose of completing the discovery of that vast country, and prosecuted in the years 1801, 1802 and 1803, in his majesty's ship The Investigator, and subsequently in the armed vessel Porpoise and Cumberland schooner. with an account of the shipwreck of the Porpoise, arrival of the Cumberland at Mauritius, and imprisonment of the commander during six years and a half in that island. by commander of The Investigator., 2 Vol. with an atlas. London: printed by Bulmer, W and Co. Cleveland Row, and published by G. and W. Nicol, booksellers to his majesty, pall-mall. Disponible en:
- <http://gutenberg.net.au/ebooks/e00049.html>
- y <http://gutenberg.net.au/ebooks/e00050.html>
- [45] FRAZER, P. (1885). A Convenient Device to be Applied to the Hand Compass. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 22 (118), 216. Disponible en:
- http://www.jstor.org/stable/982680?seq=1#page_scan_tab_contents
- [46] GAZTELU-ITURRI, R. L. (1999). *Influencia del magnetismo del buque en los desvíos de la aguja náutica. Métodos de compensación*. (Tesis Doctoral). Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación, Máquinas y Construcciones Navales. F: E.T.S. de Náutica y Máquinas Navales. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea. Cód.: 250701
- [47] GEA, P. (2003). *Compensación del magnetismo accidental del desvío de escora mediante una tercera esfera su influencia sobre el desvío cuadrantal*. (Tesis doctoral). Departamento de Energía y Propulsión Marina. Universidade da Coruña. Disponible en:
- http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fruc.udc.es%2Fbitstream%2F2183%2F1052%2F1%2FGeaVazquezPedro_opt.pdf&ei=Z75HVdXPCoOAU_vlgIAJ

<http://www.lancaster.ac.uk/fass/projects/gilbert/docs/onloadstonemagne00gilbuoft.pdf>

- [48] GILBERT, W. (1893). *On the Loadstone and Magnetic Bodies, and on the Great Magnet The Earth*. Traducido del Latín por Mottelay, P. F. Londres: Bernad Quaritch. Disponible en:

<http://www.lancaster.ac.uk/fass/projects/gilbert/docs/onloadstonemagne00gilbuoft.pdf>

- [49] GUIMARÃES, A.P. (2004). México and the early history of magnetism. *Revista Mexicana de Física*, 50 (1), 51-53. Disponible en:

http://rmf.smf.mx/pdf/rmf-e/50/1/50_1_51.pdf

- [50] GURNEY, A. (2005). *El compás. Una historia de exploración e innovación*. Barcelona: Juventud. p.141.

- [51] HAMBLING, D. (2011). GPS chaos: How a \$30 box can jam your life. *NewScientist*, March , Magazine, 2803, 44-47, Disponible en:

<http://www.newscientist.com/article/dn20202-gps-chaos-how-a-30-box-can-jam-your-life.html#.VN9PWC6rHy0>

- [52] HENNIG, R. (1932). Die Frühkenntnis der magnetischen Nordweisung. *Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie*, 21, 25.

- [53] HIRTH, F. (1906). Origin of the Mariners' Compass in China. *The Monist*, 16 (3), 321-330. Disponible en:

<http://www.jstor.org/stable/pdf/27899661.pdf?acceptTC=true>

- [54] HITCHINS, H.L., & MAY, W.E. (1955). *From lodestone to Gyro-Compass*. Published by Hutchinson's Scientific and Technical Publications, Londres. 219.

- [55] HOLMES, J.J. (2008). Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures. *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics Journal*, Morgan & Claypool Publishers, 3 (1), 1-68.

DOI:10.2200/S00150ED1V01Y200809CEM023

- [56] HOLZMAN, D. (1958). Shen Kua and his Meng Chhi Pi Than.; *T'oung Pao*, 46; 260-292.

- [57] JOHNSON, C.W., SHEA, C., HOLLOWAY, C.M. (2008). The Role of Trust and Interaction in GPS Related Accidents: A Human Factors Safety Assessment of the Global Positioning System (GPS). In: 26th Annual

Conference of the International Systems Safety Society, Vancouver, Canada, August. 25-29. Disponible en:

http://www.dcs.gla.ac.uk/~johnson/papers/GPS/Johnson_Shea_Holloway_GPS.pdf

[58] JONES, G.R., LAUGHTON, M.A., SAY, M. G. (eds.) (1993), *Magnetic Materials.* (15th ed.) in: *Electrical Engineer's Reference Book*, Butterworth Heinemann, Oxford, UK, Cap. 14.

[59] KLAPROTH, J. (1834). *Lettre à M. le Baron A. de Humboldt, sur l'invention de la Boussole.* Dondey-Dupré, Paris, Germ. tr. A. Wittstein, Leipzig, 1884; résumés P. de Larenaudière, 105. Disponible en :

<https://books.google.es/books?id=ciHFSLFKUjoC&pg=PA5&lpg=PA5&dq=Lettre+a+M.+le+Baron+A.+de+Humboldt,+sur+l%27invention+de+la+Boussole++Klaproth+J.&source=bl&ots=0ZmKPEz11Y&sig=L3pIBMQUEUtcWZwTEuskjtKEj3I&hl=es&sa=X&ei=ZqP5VOahDsPyUvSHgBg&ved=0CDAQ6AEwAg#v=onepage&q=Lettre%20a%20M.%20le%20Baron%20A.%20de%20Humboldt%2C%20sur%20l%27invention%20de%20la%20Boussole%20%20Klaproth%20J.&f=false>

[60] KNIGHT, G. (1749). Description of a Mariner's Compass contrived by Gowin Knight, M. B., F.R.S. *Philosophical Transactions.* 46, 505-512. Disponible en:

<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/46/491-96/505.full.pdf+html>

[61] — (1750). Of the Mariner's Compass that was struck with Lightning, as related in the foregoing Paper, with some further Particulars relating to that Accident, M. B., F.R.S. *Philosophical Transactions.* 46. 113-117. Disponible en:

<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/46/491-496/111>

[62] KRAMER, J. B. (1934). The Early History of the Magnetism. *Transactions of the Newcomen Society*, 14, 183-200. Disponible en:

<http://www.maneyonline.com/doi/pdfplus/10.1179/tns.1933.013>

[63] KREUTZ, B. M. (1973). Mediterranean Contributions to the Medieval Mariner's Compass. *Technology and Culture*, 14 (3), 367-383.

[64] KUMAR, S. AND MOORE, K. (2002). The evolution of global positioning system (GPS) technology. *Journal of science Education and Technology*, 11 (1), 59-80.

- [65] LAM, J., KERR, J., KORPAL, P., & RAYMAN, C. (1993). Development of COMPASS an advanced traffic management system. *Vehicle Navigation and Information Systems Conference, Proceedings of the IEEE-IEE*, 200–203.

DOI: 10.1109/VNIS.1993.585616

- [66] LANE, F. (1963). The Economic Meaning of the Invention of the Compass. *American Historical Review*, 68 (3), 605-617.

DOI: 10.1086/ahr/68.3.605

- [67] LARMOR, J. (1919). How could a rotating body such as the Sun become a magnet?. *Reports of the British Association for the Advancement of Science, 87th meeting*, .159-160. Disponible en:

<http://www.biodiversitylibrary.org/item/96028>

- [68] LI SHU-HUA. (1954). Origine de la Boussole, II; Aimant et Boussole. *Isis*, The University of Chicago Press, 45 (2), 175-196.

DOI: 10.1086/348315

- [69] — (1954). Première Mention de l'Application de la Boussole à la Navigation. *Oriens Extremus*, 1, 6-10. Disponible en:

http://www.oriens-extremus.de/inhalt/pdf/01/oe01_02.pdf

- [70] LIBES, A. (1813). Histoire Philosophique des Progrès de la Physique. Caurcier, Paris. Vol. 4, 272.

- [71] LIPPMANN, E.O. Von. (1932). Geschichte d. Magnet-Nadel bis zur Erfindung des Kompasses (gegen +1300). *Quellen und Studien zur Geschichte der Naturwissenschaften und der Medizin*; 3, 1. Also separately published, Springer, Berlin.

- [72] LIU, J. F., ZHANG, Y., HADJIPANAYIS, G. C. (1999). High Temperature Magnetic Properties and Microstructural Analysis of Sm(Co, Fe, Cu, Zr) Permanent Magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 202 (1), 69-76.

DOI: 10.1016/S0304-8853(99)00322-4. Disponible en:

http://ac.els-cdn.com/S0304885399003224/1-s2.0-S0304885399003224-main.pdf?tid=cdbb4b6c-3dea-11e5-9417-0000aacb35f&acdnat=1439051618_25aef5b77699ad486dcae2982d764d12

- [73] LUSHNIKOV, E.M. (2012). The Actual Problem of Magnetic Compass at Contemporary Navigation. *Scientific Journals, Maritime University of Szczecin*, 32(104)z. 2, 103-104. Disponible en:
- <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-article-BWM7-0007-0040/content/partContents/50a2cde2-35a5-314c-8b62-66e5da419b2d>
- [74] LÜTZHÖFT, M.H. and DEKKER, S.W.A. (2002). On Your Watch: Automation on the Bridge. *Journal of Navigation*, 55 (1), 83-96, Disponible en:
- http://www.healrt.org/filemanager/root/site_assets/standalone_articles_not_linked_to_a_bulletin/HE00050.pdf
- [75] MARCUS, G. J. (1953). The Navigation of the Norsemen. *The Mariner's Mirror*; 39 (2), 112-131.
- DOI: 10.1080/00253359.1953.10658157
- [76] MANNERS, J. (2000). *Static Fields and Potentials*. USA: CRC Press. 256. ISBN 0-7503-0718-8.
- [77] MARTÍN, F.J., MARTÍN, J. (2003). *Apuntes de Electricidad Aplicados a los Buques*. Alicante: Editorial Club Universitario.
- [78] MARTIN, T. H.: (1866); *La Foudre, l'Électricité et le Magnétisme chez les Anciens*. Didier, Paris; p. 418.
- [79] MARTINEZ-LOZARES, A. T. (2009) *Compas magnético integral para la obtención de desvíos en tiempo real a partir de un sistema global de navegación por satélite (GNSS)*. (Tesis Doctoral). Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación, Máquinas y Construcciones Navales. F: E.T.S. de Náutica y Máquinas Navales. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea.
- [80] MARTINEZ-LOZARES, A. T., PEÑA, F. J., VILA, J. A. (2011) *La aguja magnética y su compensación. Comportamiento de la aguja magnética*. Editorial Académica Española. Hamburgo (Alemania). ISBN 978-3-8465-6560-5. pp. 262.
- [81] MAY, W.E. (1947). Historical Notes on the Deviation of the Compass. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 52 (2), 217-231.
- DOI: 10.1029/TE052i002p00217
- [82] — (1949). The Birth of the Compass. *Journal of the Institute of Navigation*, 2 (3), 259-263.

DOI: [10.1017/S0373463300031969](https://doi.org/10.1017/S0373463300031969)

- [83] — (1952). The history of the Magnetic Compass. *The Mariner's Mirror*, 38 (3), 210-222.

DOI: [10.1080/00253359.1952.10658123](https://doi.org/10.1080/00253359.1952.10658123)

- [84] — (1953). Naval Compasses in 1707. *Journal of Navigation*, 6 (4), 405-409.

DOI: [10.1017/S0373463300027879](https://doi.org/10.1017/S0373463300027879)

- [85] — (1954). The Binnacle. *The Mariner's Mirror*, 40 (1), 21-32.

DOI: [10.1080/00253359.1954.10658189](https://doi.org/10.1080/00253359.1954.10658189)

- [86] — (1955). Alexander Neckham and the Pivoted Compass Needle. *Journal of the Institute of Navigation*; 8 (3), 283-284.

DOI: [10.1017/S0373463300016015](https://doi.org/10.1017/S0373463300016015)

- [87] — (1959). Longitude by Variation. *The Mariner's Mirror*, 45 (4), 339-341.

DOI: [10.1080/00253359.1959.10658462](https://doi.org/10.1080/00253359.1959.10658462)

- [88] — (1960). The Last Voyage of Sir Clowdisley Shovell. *Journal of Navigation*, 13 (3), 324-332.

DOI: [10.1017/S0373463300033646](https://doi.org/10.1017/S0373463300033646)

- [89] — (1979), Garlic and the Magnetic Compass. *The Mariner's Mirror*, 65 (3), 231-234.

DOI: [10.1080/00253359.1979.10659149](https://doi.org/10.1080/00253359.1979.10659149)

- [90] McCAIG, M. and CLEGG, A.G. (1987). *Permanent Magnets in Theory and Practice*. (2^a ed.), London: Pentech and Wiley, New York, (Gives a list of permanent magnets makers throughout the world).

- [91] MITCHELL, A.C. (1932). Chapters in the History of Terrestrial Magnetism, (I) On the directive property of a magnet in the Earth's field and the origin of the nautical compass. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 37, 105-146.

DOI: [10.1029/TE037i002p00105](https://doi.org/10.1029/TE037i002p00105)

- [92] MOULE, A. C. (1924). The Chinese South-Pointing Carriage. *T'oung Pao*, 23 (2/3), 83-98.

-
- [93] NEEDHAM, J. (1959). Mathematics and the Sciences of the Heavens and Earth. Vol. 3, *Science and Civilisation in China*. England, Introduction, originally publ. by Cambridge University Press.
- [94] — (1962). Physics and Physical Technology: Physics Vol. 4, Part 1 in *Science and Civilisation in China*. England, Introduction, originally publ. by Cambridge University Press.
- [95] — (1965). Mechanical Engineering. Vol. 4, Part 2 in *Science and Civilisation in China*. England, Cambridge University Press.
- [96] NORMAN, R. (1720). The Newe Attractive, Shewing the Nature, Property and Manifold Vertius of the Loadstone; with the Declination of the Needle, London, pp. 6-43. Disponible en:
- <https://archive.org/details/neweattractives00normgoog>
- [97] O'HANDLY, R.C. (2000). *Modern Magnetic Materials: Principles and Applications*. New York, Ed. John Wiley, pp. 768. ISBN: 978-0-471-15566-9
- [98] PAGENDORFF, J. C. (1879). *Geschikte der Physik*. Leipzig, Germany: Barth, J. A. 937.
- [99] PEREGRINUS, P. (1904). *The letter of Petrus Peregrinus on the magnet, A.D. 1269*, Traducción de BROTHER ARNOLD, M. SC, New York: McGraw Publishing Company. Disponible en:
- <https://archive.org/stream/letterofpetrusp00pieriala#page/n73/mode/2uphttps://ia600500.us.archive.org/17/items/letterofpetrusp00pieriala/letterofpetrusp00pieriala.pdf>
- [100] PÉREZ-REVERTE, A. (2014). Navegando sin GPS, en Patente de Corso citado 12-5-2014], *SLSemanal*, Vol. 14, Disponible en:
- <http://www.perezreverte.com/articulo/patentes-corso/915/navegando-sin-gps/>
- [101] PAYNE, C. M. (2006). *Principles of Naval Weapon Systems*, Naval Institute Press. p. 208, ISBN 978-1-59114-658-2.
- [102] POISSON, S. (1838). Memoire sur les deviations de la boussole, produits par le fer de vaisseaux. *Memoires de l'Académie Royal des Sciences de L'Institut de France*. Tome XVI. pp. 479-555. Disponible en:
- <https://play.google.com/books/reader?id=YkhUAAAACAAJ&printsec=frontcover&output=reader&hl=es&pg=GBS.PP1>

- [103] REITZ, J.R., MILFORD, F.J., CHRISTY, R.W. (1996). *Fundamentos de la teoría electromagnética*. versión en español de Carlos Gerardo Martínez Ávila con la colaboración de José Luis Sebastián Franco y Juan Antonio Flores Lira.; 4ª ed., Addison-Wesley Iberoamericana, Argentina [etc.], 641 págs.
- [104] SARTON, G. (1931). *Introduction to the History of Science*. Vol. 2, (2 parts), Williams & Wilkins, Baltimore (Carnegie Institution public. N° 376).
- [105] — (1931). From Rabbi Ben Ezra to Roger Bacon, Volume II, Part I Only: Rabbi Ben Ezra to Ibn Rushd in *Introduction to the History of Science*, Williams & Wilkins, Baltimore (Carnegie Institution public. N° 376), 480.
- [106] — (1931). From Rabbi Ben Ezra to Roger Bacon, Volume II, Part II Only: Robert Grosseteste to Roger Bacon in *Introduction to the History of Science*, Williams & Wilkins, Baltimore (Carnegie Institution public. N° 376), 481-1251.
- [107] SAUSSURE, L. De (1923). L'Origine de la Rose de Vents et l'Invention de la Boussole. *Instructions nautiques et routiers Arabes et Portugais*, *Archive des Sciences Physiques et Naturelles*, 5 (n° 2 y 4), 128.
- [108] SAVAGE-SMITH, E. (1988). Gleanings from an Arabist's Workshop: Current Trends in the Study of Medieval Islamic Science and Medicine. *Isis: A Journal of the History of Science*, 79, 246-266.
- [109] SCORESBY, W. (1820). *An Account of the Arctic Regions with a History and Description of the Northern Whale Fishery*. Vol. 1 The Arctic. Vol. 2 The whale-fishery. Impreso por Archibald Constable and Co. Edimburgo., 1, 674. 2, 588. Disponible en:

<https://ia800303.us.archive.org/5/items/accountofarcticr01scor/accountofarcticr01scor.pdf>
- [110] — (1854). An inquiry into the Principles and Measures on which Safety in the Navigation of Iron Ships may be reasonably looked for. *Report of the British Association for the Advancement of Science*, 24, 53-54.
- [111] — (1854). On the Loss of the Tayleur and the Changes in the Action of Compasses on Iron Ships. *Report of the British Association for the Advancement of Science*, 24, 49-52.
- [112] — (1859). Journal of a Voyage to Australia and Round the World for Magnetical Research. Edición de Archibald Smith. Londres. 411. Disponible en:

https://books.google.com.vc/books?id=uFMpAAAAYAAJ&pg=PA94&hl=es&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false

-
- [113] SELIN, H. (ed.) (1997). *Encyclopaedia of the History of Science, Technology, and Medicine in Non-Western Cultures*. Dordrecht: Kluwer Academic. 541.
- [114] SERVICIENCIA S.L. (2003). *Notas de aplicaciones*. Disponible en:
<http://www.serviciencia.es/not-apli/NAS01-e.pdf>
- [115] SCHMIDL, P.G. (1997). Two early Arabic Sources on the Magnetic Compass. *Journal of Arabic and Islamic Studies*, 1 (1), 81-132. Disponible en:
http://www.lancaster.ac.uk/jais/volume/docs/vol1/1_081132schmidl2.pdf
- [116] SHU-HUA, L. (1954). Origine de la Boussole II. Aimant et Boussole. *Isis*, 45 (2), 175-196.

DOI: 10.1086/348315.
- [117] SMITH, A. (1854). On the Deviation of the Compass in Wooden and Iron Ships. *Report of the British Association for the Advancement of Science*, 24, 434-438.
- [118] SOLVER, C. V. (1946). Leidarsteinn The Compass of the Vikings. *Old-Lore Miscellany of Orkney Shetland*, 10, 293-321.
- [119] STANDARD ESPECIFICATIONS FOR PERMANENT MAGNET MATERIALS, MMPA Standard (0100-00). Magnetic Materials Producers Association, Chicago, Illinois (60603), 28.
- [120] STOCKWELL, F. (2003). *Westerners in China: A History of Exploration and Trade, Ancient Times through the Present*. Londres: Jefferson, N.C. McFarland & Company, 226. ISBN: 0-7864-1404-9
- [121] TAYLOR, E. G. R. (1951). The South-Pointing Needle. *Imago Mundi: The International Journal for the History of Cartography*, 8 (1), 1-7.

DOI: 10.1080/03085695108591973
- [122] — (1951). The Oldest Mediterranean Pilot. *Journal of the Institute of Navigation*, 4 (1), 81-85.

DOI: 10.1017/S0373463300048785
- [123] THE ECONOMIST. (2013). GPS jamming: Out of sight, Satellite positioning-data are vital—but the signal is surprisingly easy to disrupt. Jul 27th, Disponible en:

<http://www.economist.com/news/international/21582288-satellite-positioning-data-are-vitalbut-signal-surprisingly-easy-disrupt-out>

[124] THOMPSON, S. P. (1913). *The Rose of the Winds; the Origin and Development of the Compass-Card*. Oxford University Press, 179.

[125] THOMSON, W. (1878). On Compass Adjustment in Iron Ships, and on a New Sounding Apparatus. *Royal United Services Institution. Journal*, 22 (94), 93-120.

DOI: 10.1080/03071847809416339

[126] — (1880). Recent Improvements in the Compass, with the Correctors for Iron Ships. *Royal United Services Institution. Journal*, 24 (106), 404-414.

DOI: 10.1080/03071848009418250

[127] TIBBETTS, G. R. (1973). Comparisons between Arab and Chinese Navigational Techniques. *Bulletin of the School of Oriental and African Studies*, 36 (1), 97-108.

DOI: 10.1017/S0041977X00098013

[128] YILMAZ, I. , GULLU, M. , YILMAZ, M. , [et. ál.]. (2010). Compass roses on the Book of Navigation (Kitab-i Bahriye): Declination data source for geomagnetic field models. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. Vol. 182 (3-4). 170-174.

DOI: 10.1016/j.pepi.2010.07.011

[129] YOUNG, T. (1820). Computations for clearing the Compass of the Regular Effect of a Ship's Permanent Attraction. *The Quarterly Journal*, 9, 372-380. Disponible en:

https://books.google.es/books?id=fhk_AAAAYAAJ&printsec=frontcover&dq=Quarterly+Journal,+volume+9,+372&hl=es&sa=X&ved=0CC0Q6AEwAmoVChMIInuGs8IufxwIVC50aCh3ccQdW#v=onepage&q&f=false

[130] WADDELL, J. (1749). Letter from Captain John Waddell to Mr. Naphthali Franks Merchant, concerning the Effects of Lightning in Destroying the Polarity of a Mariners Compass; To Which Are Subjoined Some Remarks Thereon, by Gowin Knight, M. B. F. R. S. *Philosophical Transactions*, 46, 111-117. Disponible en:

<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/46/491-496/111.full.pdf+html>

[131] WAGNER, J., SORG, H., RENZ, A. (2005). The Machine of Bohnenberger. *European Journal of Navigation*, 3 (4), 69-77. Disponible en:

<http://www.riverblindness.eu/wp-content/uploads/2010/05/EJN-0805-Science-Wagner-Renz.pdf>

https://www.ion.org/museum/files/File_1.pdf

[132] WARNER, D. J. (1994). Compasses and Coils: The Instrument Business of Edward S. Ritchie, *Rittenhouse*, 9, 1 (33), 1-24.

[133] WATERS, D. W. (1952). The Lubber's Point, *The Mariner's Mirror*, 38 (3), 223-236.

[134] WU, JH. , LI, H. , LI, HX. (2011). 3-D Interactive Simulation of Magnetic Compass Adjustment Based on VRML. *Advanced Manufacturing Technology*, pts 1, 2. Vol. 156-157. 211-216.

DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.156-157.211

[135] WYLIE, A. (1897). *Chinese Researches*. Shangai, 549. Disponible en:

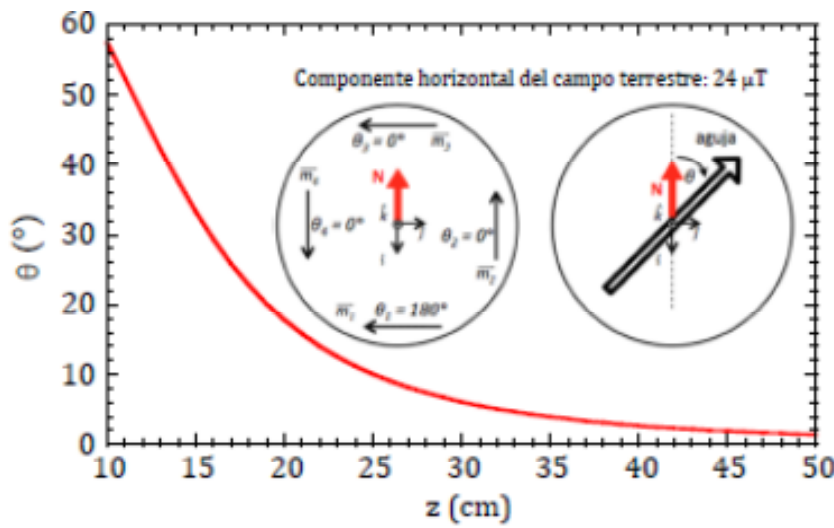
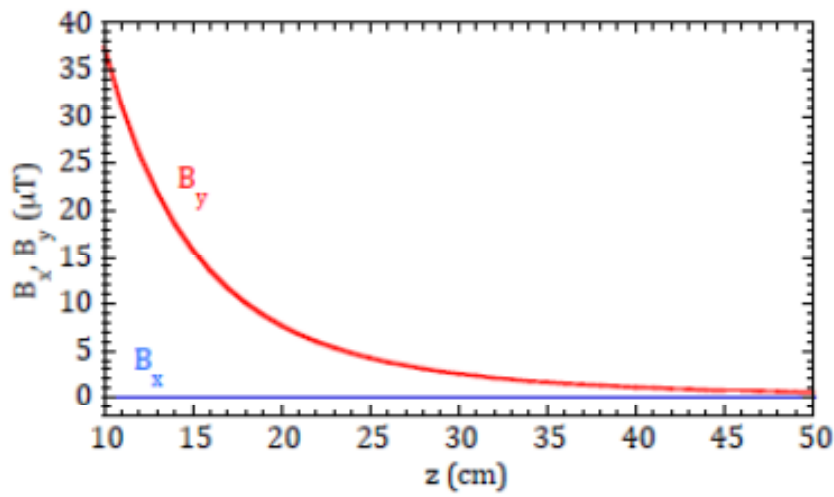
<http://library.uoregon.edu/ec/e-asia/read/wylie-1.pdf>

[136] ZHANG, Y; CORTE-REAL, M.; HADJIPANAYIS, G.C. [et. ál.]. (2000). Magnetic hardening studies in sintered Sm.Co,Cux,Fe,Zr. z 2:17 high temperature magnets. *Journal of Applied Physics*, Buenos Aires, 87 (9), 6722-6724. Disponible en:

http://depts.washington.edu/kkgroup/publications/PDF/2000_Zhang_Sm_mag_harden.pdf

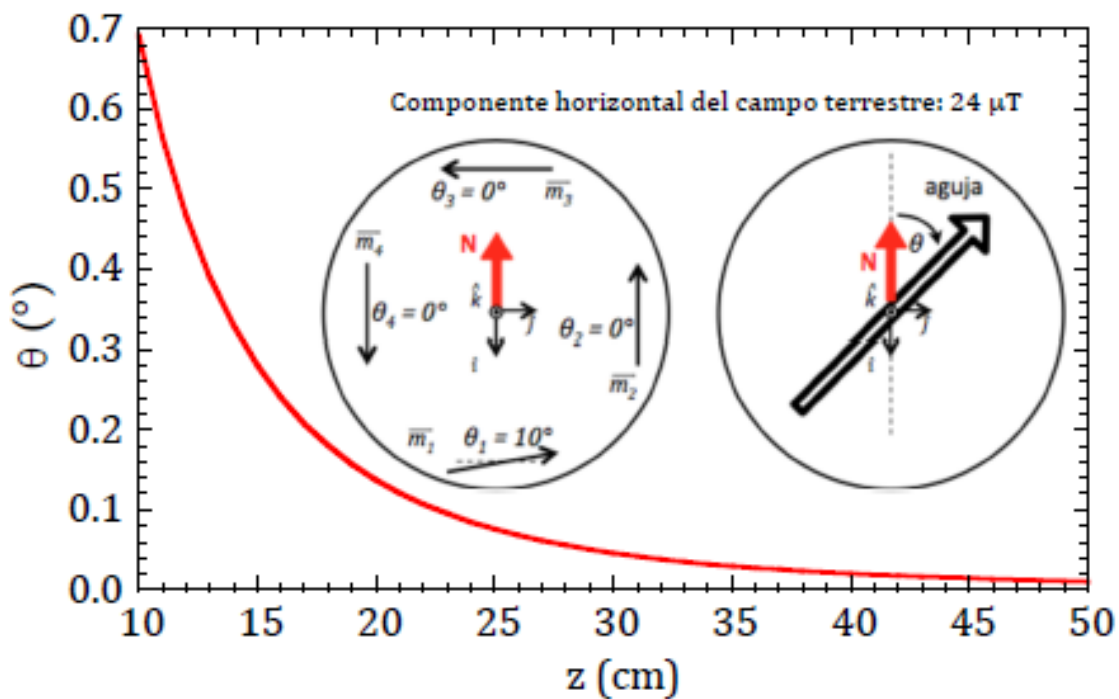
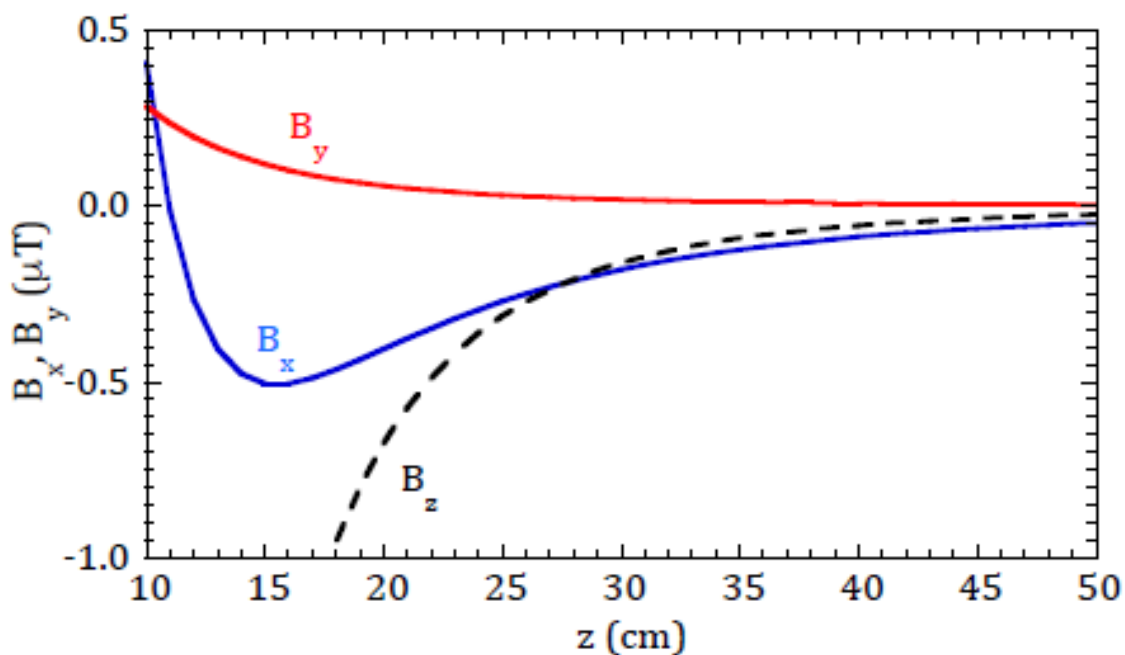
ANEXO I

CASO 1

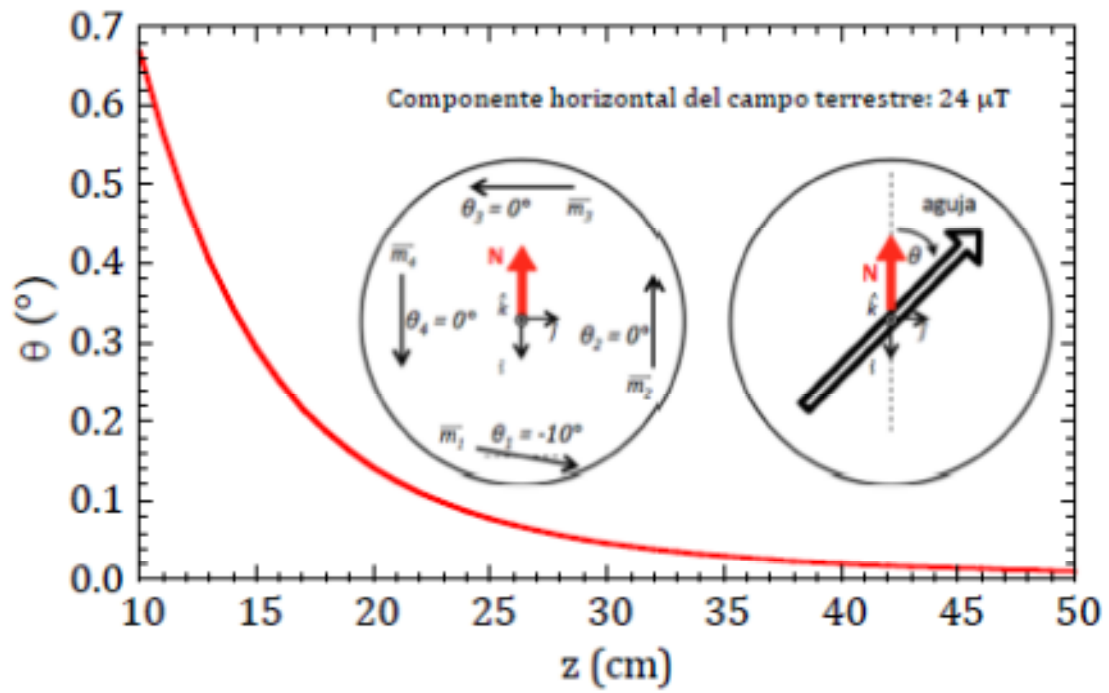
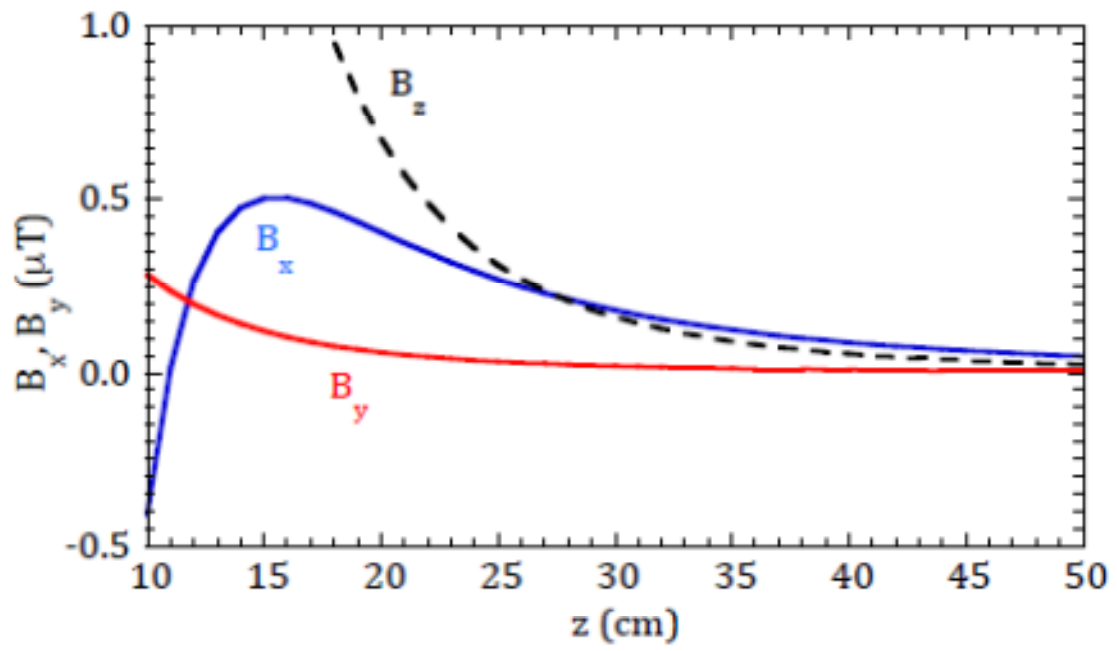


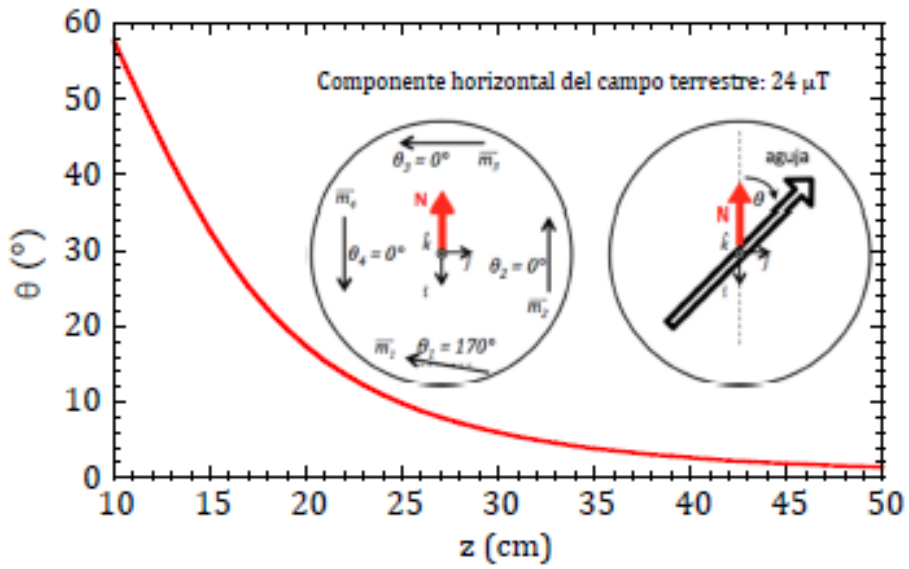
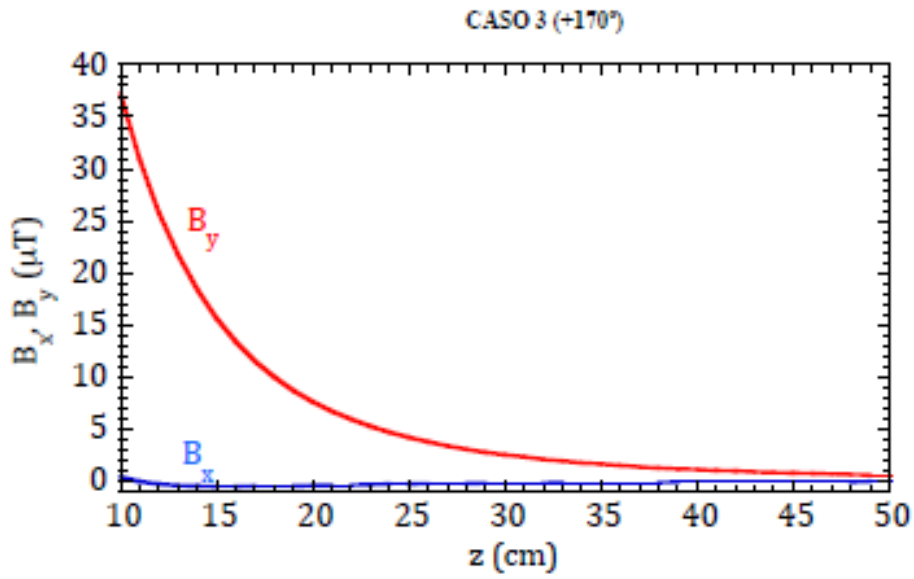
θ ($^\circ$)	z (cm)
1	53.9
2	44.3
3	38.5
4	34.8
5	32.2
6	30.1
7	28.5
8	27.2
9	26.0
10	25.0
11	24.1
12	23.4
13	22.7
14	22.0
15	21.4
16	20.9
17	20.4
18	19.9
19	19.5
20	19.1
21	18.7
22	18.3
23	17.9
24	17.6
25	17.3
26	17.0
27	16.7
28	16.4
29	16.1
30	15.8
31	15.6
32	15.3
33	15.1
34	14.8
35	14.6
36	14.4
37	14.2
38	13.9
39	13.7
40	13.5

CASO 2 (+10°)



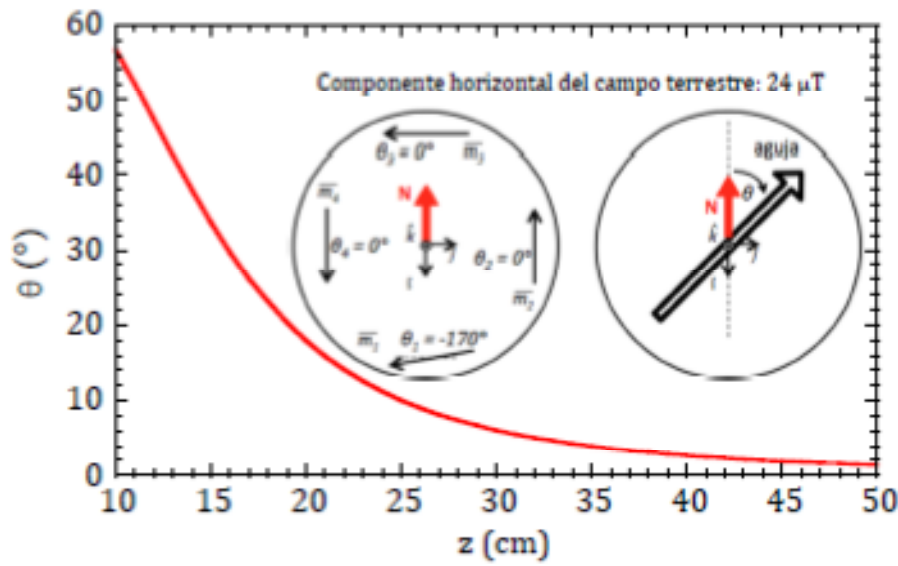
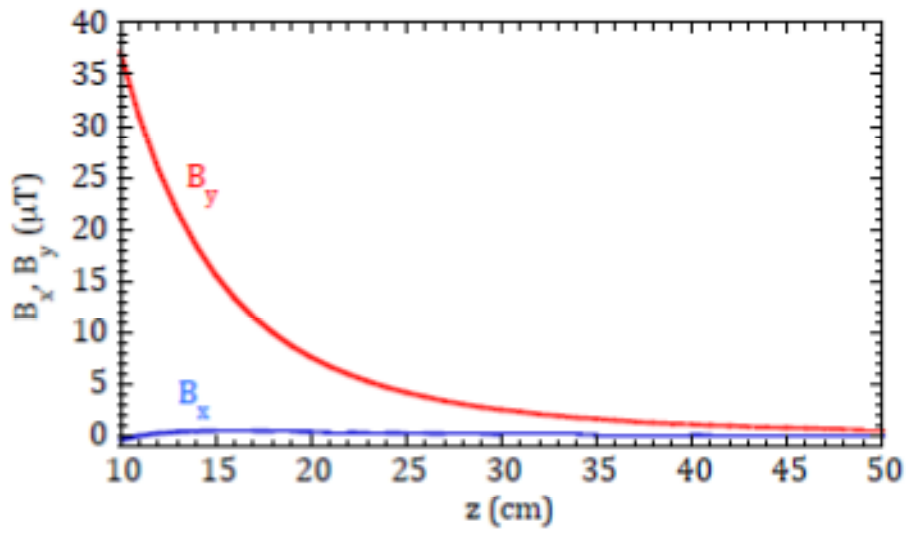
CASO 2



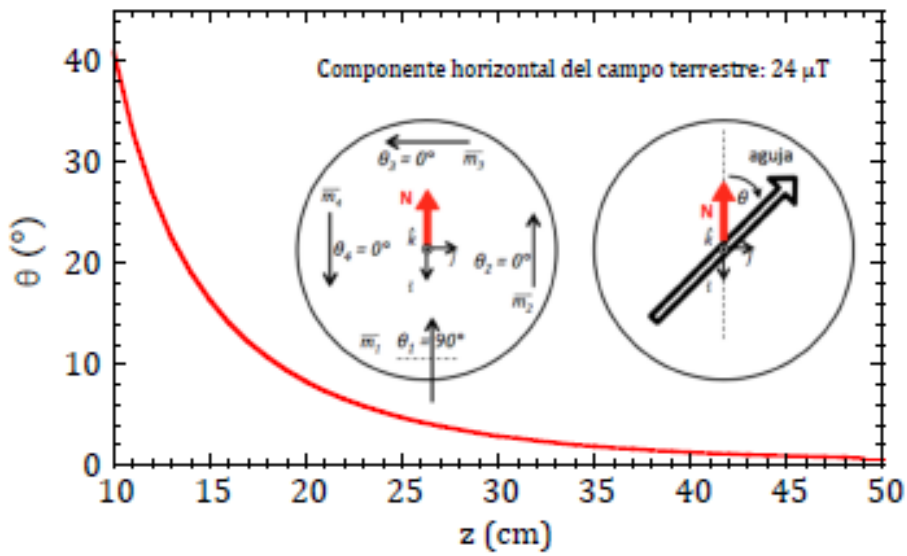
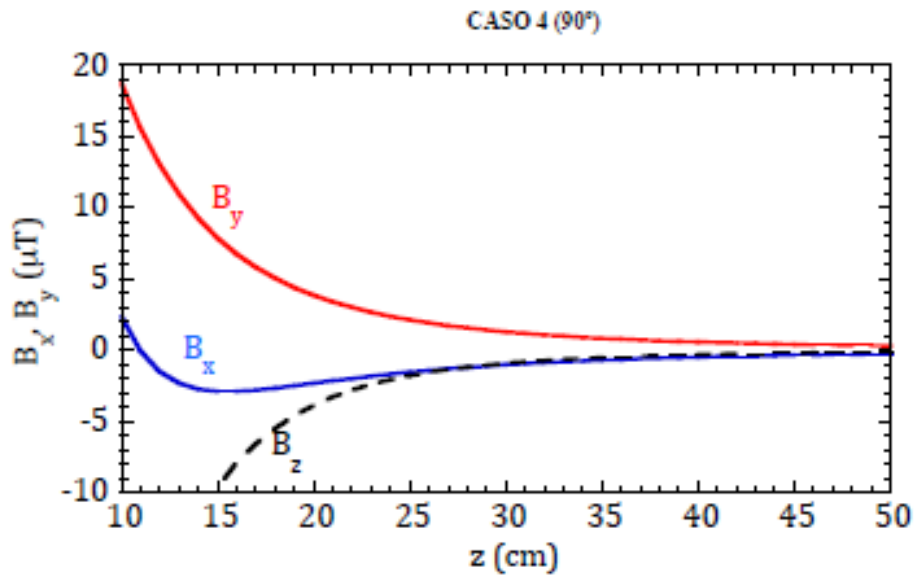


θ (°)	z (cm)
1	53.8
2	44.1
3	38.4
4	34.7
5	32.0
6	30.0
7	28.4
8	27.0
9	25.8
10	24.8
11	24.0
12	23.2
13	22.5
14	21.8
15	21.2
16	20.7
17	20.2
18	19.7
19	19.3
20	18.9
21	18.5
22	18.1
23	17.7
24	17.4
25	17.1
26	16.8
27	16.5
28	16.2
29	15.9
30	15.7
31	15.4
32	15.1
33	14.9
34	14.7
35	14.4
36	14.2
37	14.0
38	13.8
39	13.6
40	13.4

CASO 3 (-170°)

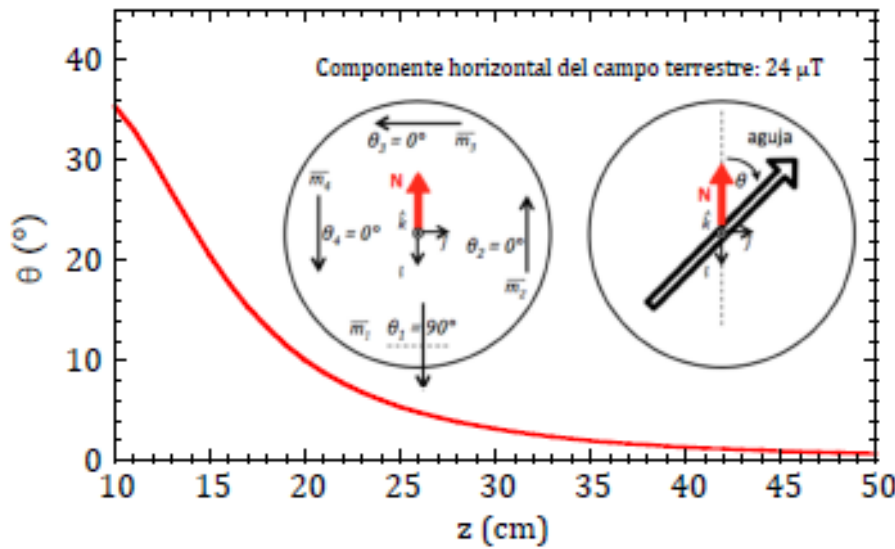
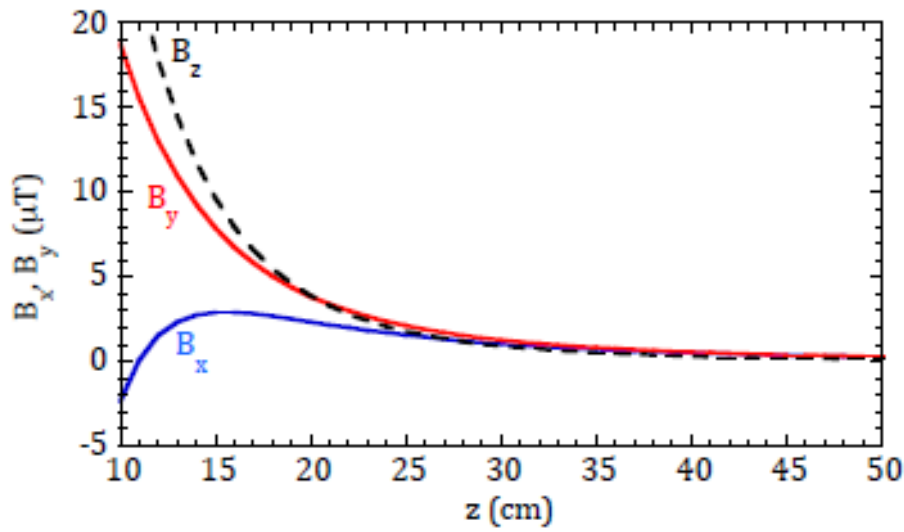


θ (°)	z (cm)
1	53.8
2	44.2
3	38.5
4	34.8
5	32.2
6	30.1
7	28.5
8	27.2
9	26.0
10	25.1
11	24.2
12	23.4
13	22.7
14	22.1
15	21.5
16	20.9
17	20.4
18	20.0
19	19.5
20	19.1
21	18.7
22	18.4
23	18.0
24	17.7
25	17.4
26	17.1
27	16.8
28	16.5
29	16.2
30	15.9
31	15.7
32	15.4
33	15.2
34	14.9
35	14.7
36	14.5
37	14.2
38	14.0
39	13.8
40	13.6



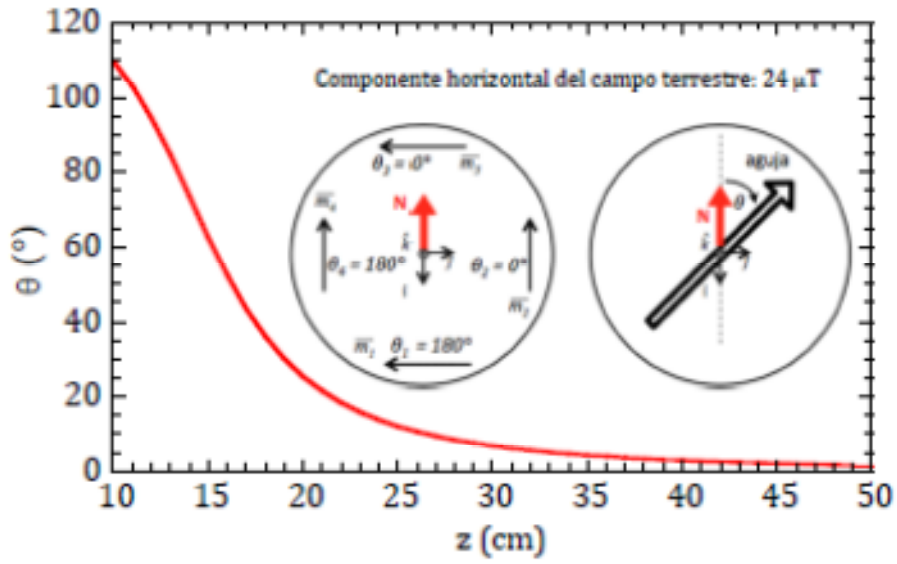
θ (°)	z (cm)
1	44.4
2	34.5
3	29.7
4	26.7
5	24.5
6	22.8
7	21.5
8	20.3
9	19.4
10	18.5
11	17.8
12	17.2
13	16.6
14	16.1
15	15.6
16	15.1
17	14.7
18	14.4
19	14.0
20	13.7
21	13.4
22	13.2
23	12.9
24	12.7
25	12.4
26	12.2
27	12.0
28	11.8
29	11.6
30	11.5
31	11.3
32	11.1
33	11.0
34	10.8
35	10.7
36	10.6
37	10.4
38	10.3
39	10.2
40	10.1

CASO 4 (-90°)



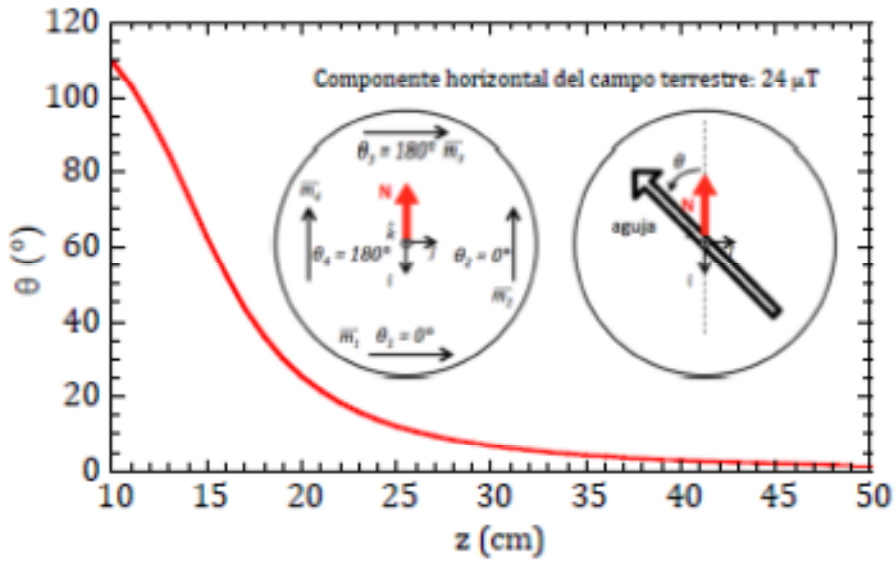
θ (°)	z (cm)
1	44.7
2	35.2
3	30.6
4	27.7
5	25.7
6	24.1
7	22.8
8	21.8
9	20.8
10	20.1
11	19.4
12	18.7
13	18.2
14	17.7
15	17.2
16	16.7
17	16.3
18	15.9
19	15.5
20	15.2
21	14.8
22	14.5
23	14.2
24	13.9
25	13.6
26	13.3
27	13.0
28	12.6
29	12.3
30	12.0
31	11.7
32	11.4
33	11.0
34	10.6
35	10.2
36	9.7
37	9.3
38	8.8
39	8.4
40	7.9

CASE 5



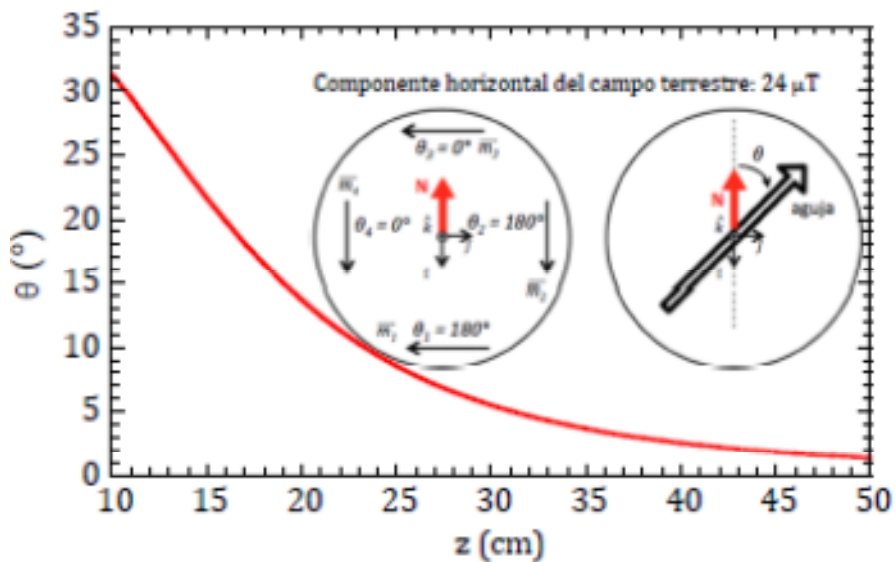
θ ($^{\circ}$)	z (cm)
1	53.4
2	45.6
3	39.4
4	35.7
5	33.2
6	31.3
7	29.7
8	28.5
9	27.4
10	26.5
11	25.8
12	25.1
13	24.5
14	23.9
15	23.4
16	23.0
17	22.5
18	22.1
19	21.8
20	21.5
21	21.1
22	20.9
23	20.6
24	20.3
25	20.1
26	19.8
27	19.6
28	19.4
29	19.2
30	19.0
31	18.8
32	18.6
33	18.5
34	18.3
35	18.2
36	18.0
37	17.8
38	17.7
39	17.6
40	17.4

CASE 6



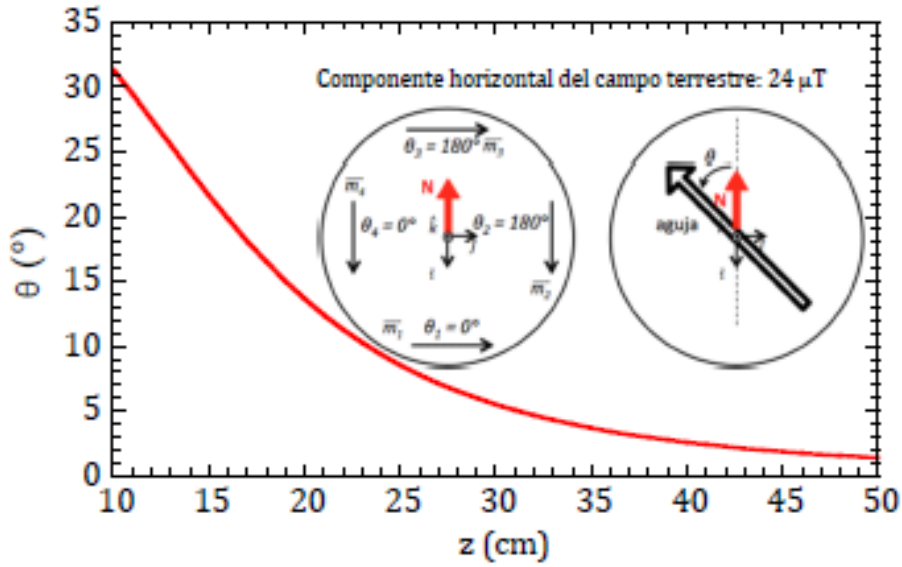
θ ($^\circ$)	z (cm)
1	53.4
2	45.6
3	39.4
4	35.7
5	33.2
6	31.3
7	29.7
8	28.5
9	27.4
10	26.5
11	25.8
12	25.1
13	24.5
14	23.9
15	23.4
16	23.0
17	22.5
18	22.1
19	21.8
20	21.5
21	21.1
22	20.9
23	20.6
24	20.3
25	20.1
26	19.8
27	19.6
28	19.4
29	19.2
30	19.0
31	18.8
32	18.6
33	18.5
34	18.3
35	18.2
36	18.0
37	17.8
38	17.7
39	17.6
40	17.4

CASE 7



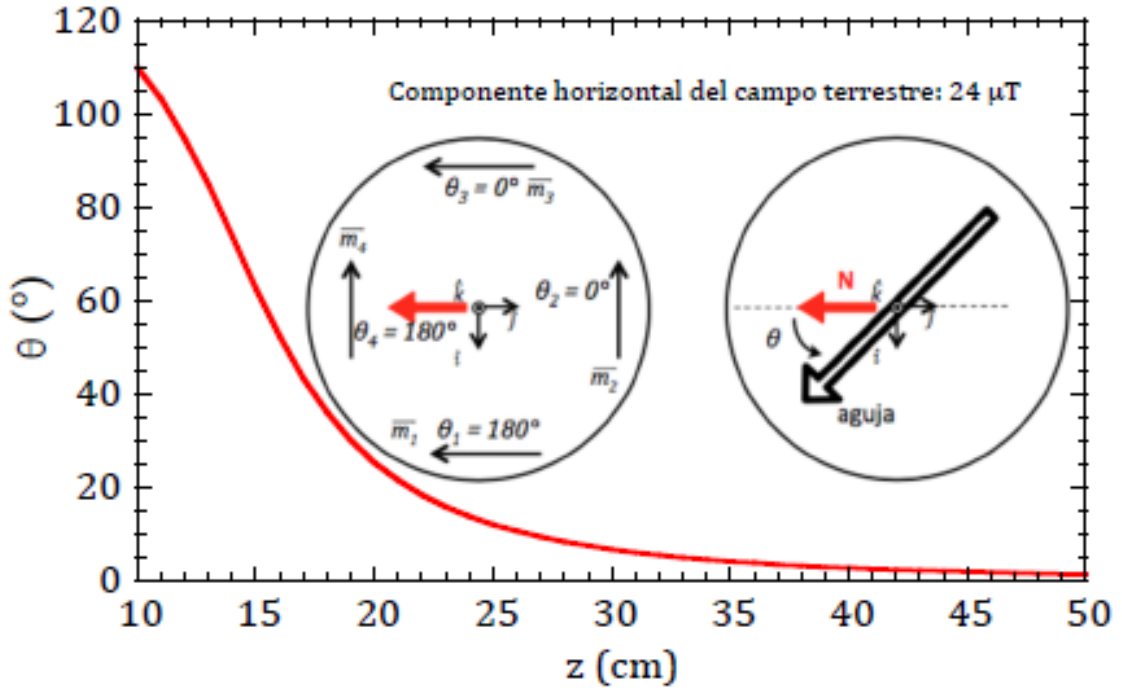
θ ($^{\circ}$)	z (cm)
1	54.1
2	43.7
3	37.8
4	33.9
5	31.1
6	29.0
7	27.2
8	25.7
9	24.4
10	23.3
11	22.3
12	21.4
13	20.5
14	19.7
15	19.0
16	18.3
17	17.7
18	17.1
19	16.5
20	15.9
21	15.3
22	14.8
23	14.3
24	13.8
25	13.3
26	12.8
27	12.3
28	11.7
29	11.2
30	10.7
31	10.2
32	9.7
33	9.1
34	8.6
35	8.1
36	7.5
37	7.0
38	6.5
39	6.0
40	5.4

CASE 8

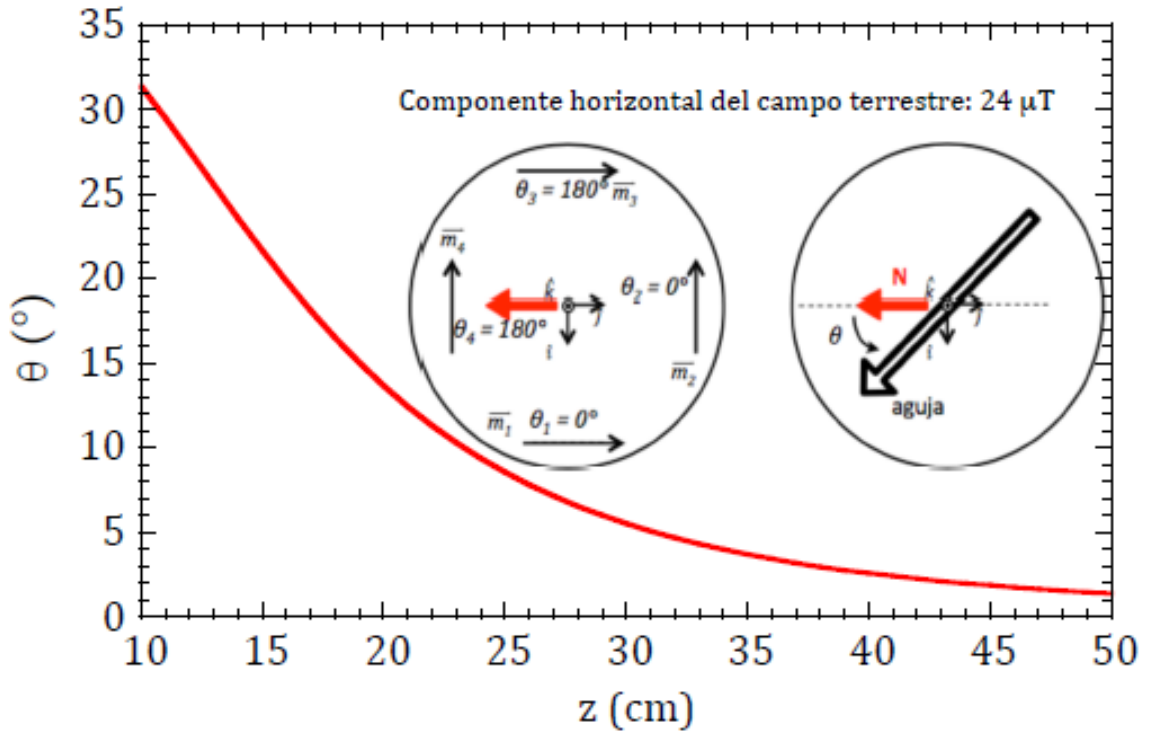


θ ($^\circ$)	z (cm)
1	54.1
2	43.7
3	37.8
4	33.9
5	31.1
6	29.0
7	27.2
8	25.7
9	24.4
10	23.3
11	22.3
12	21.4
13	20.5
14	19.7
15	19.0
16	18.3
17	17.7
18	17.1
19	16.5
20	15.9
21	15.3
22	14.8
23	14.3
24	13.8
25	13.3
26	12.8
27	12.3
28	11.7
29	11.2
30	10.7
31	10.2
32	9.7
33	9.1
34	8.6
35	8.1
36	7.5
37	7.0
38	6.5
39	6.0
40	5.4

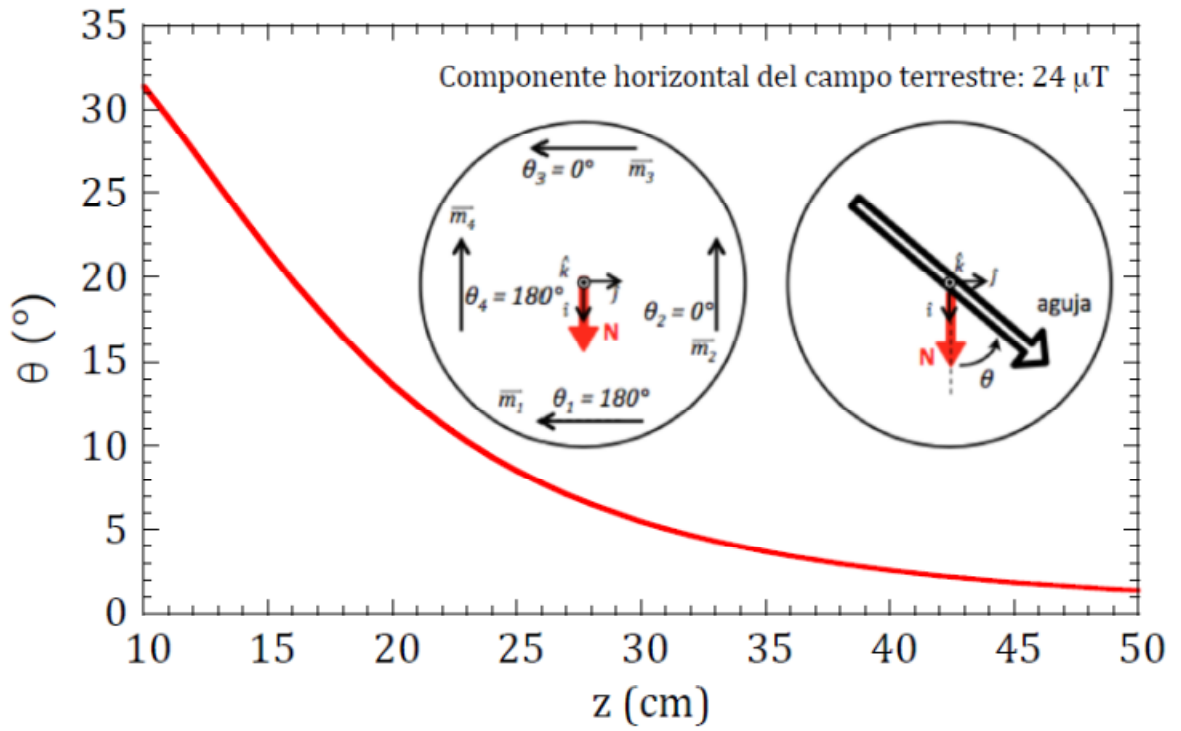
CASE 9



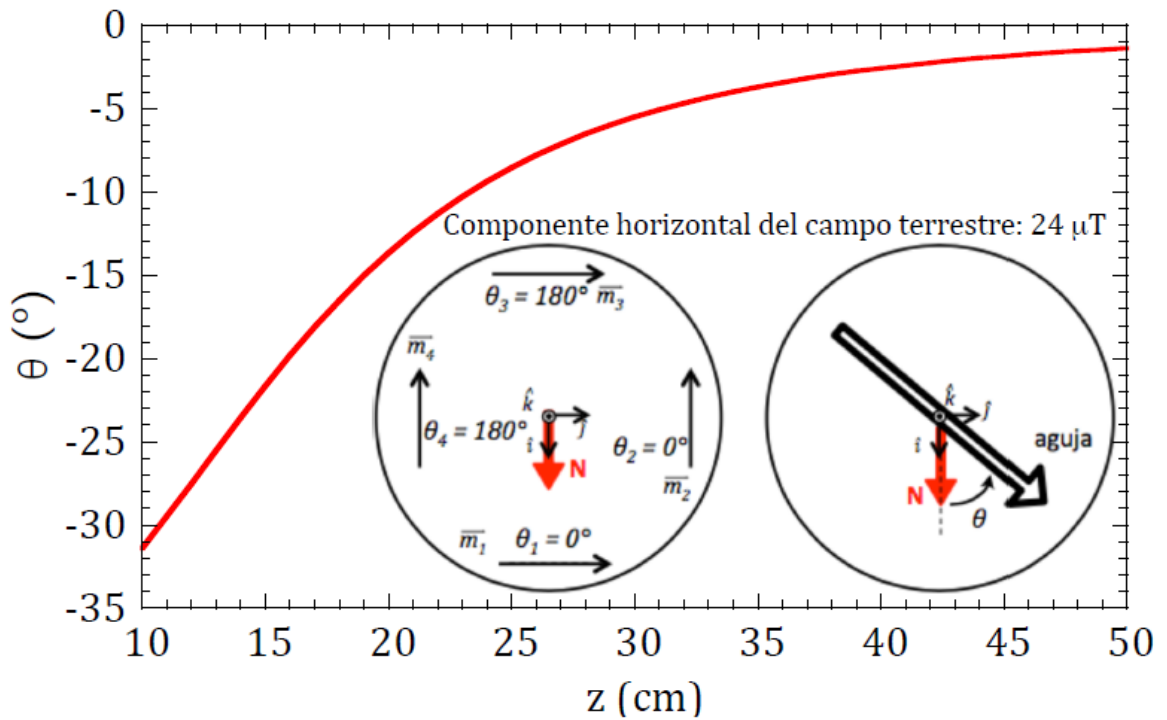
CASE 10



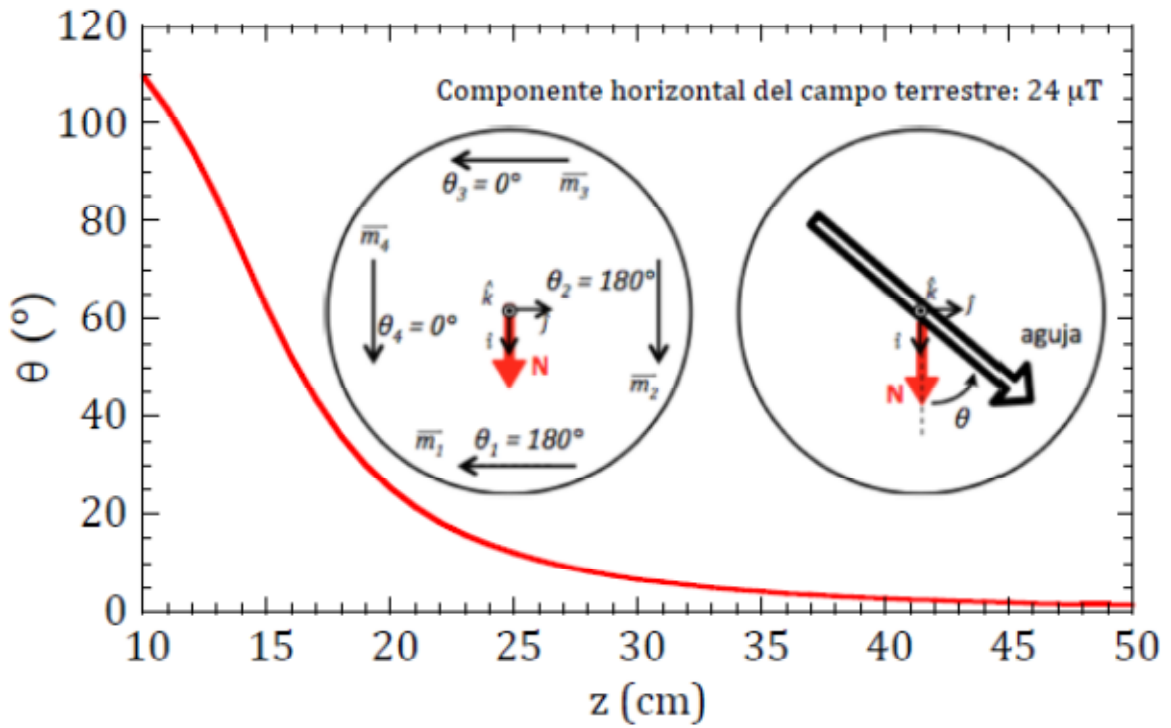
CASE 13



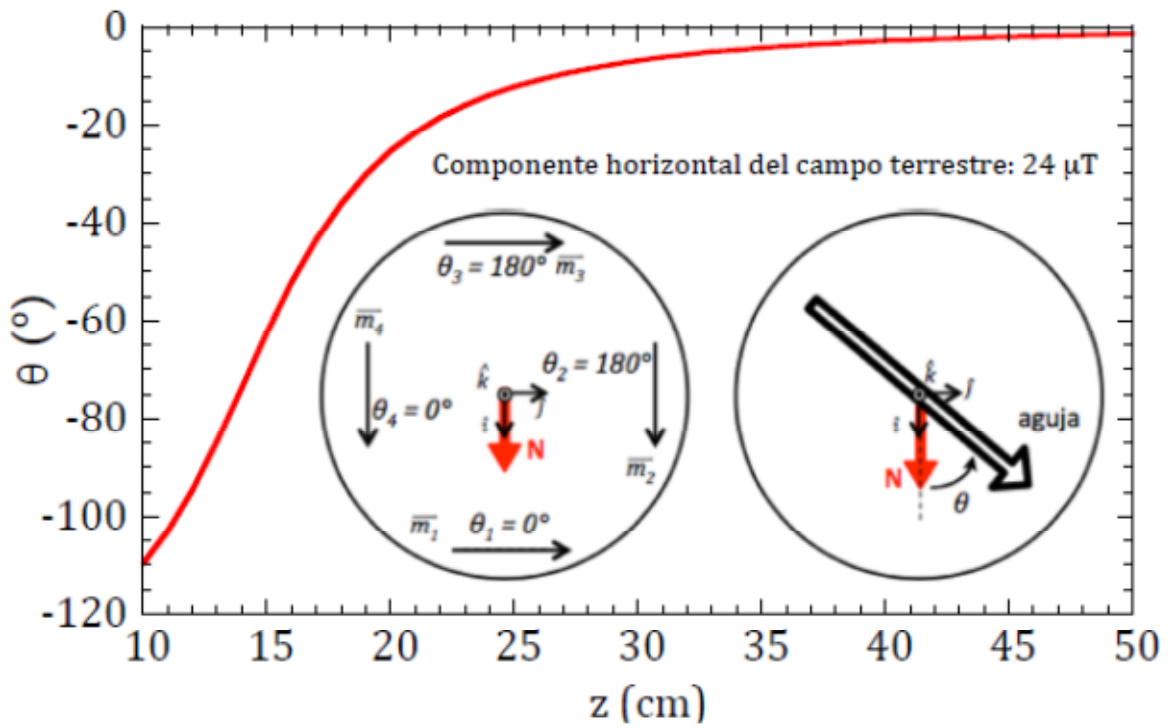
CASE 14



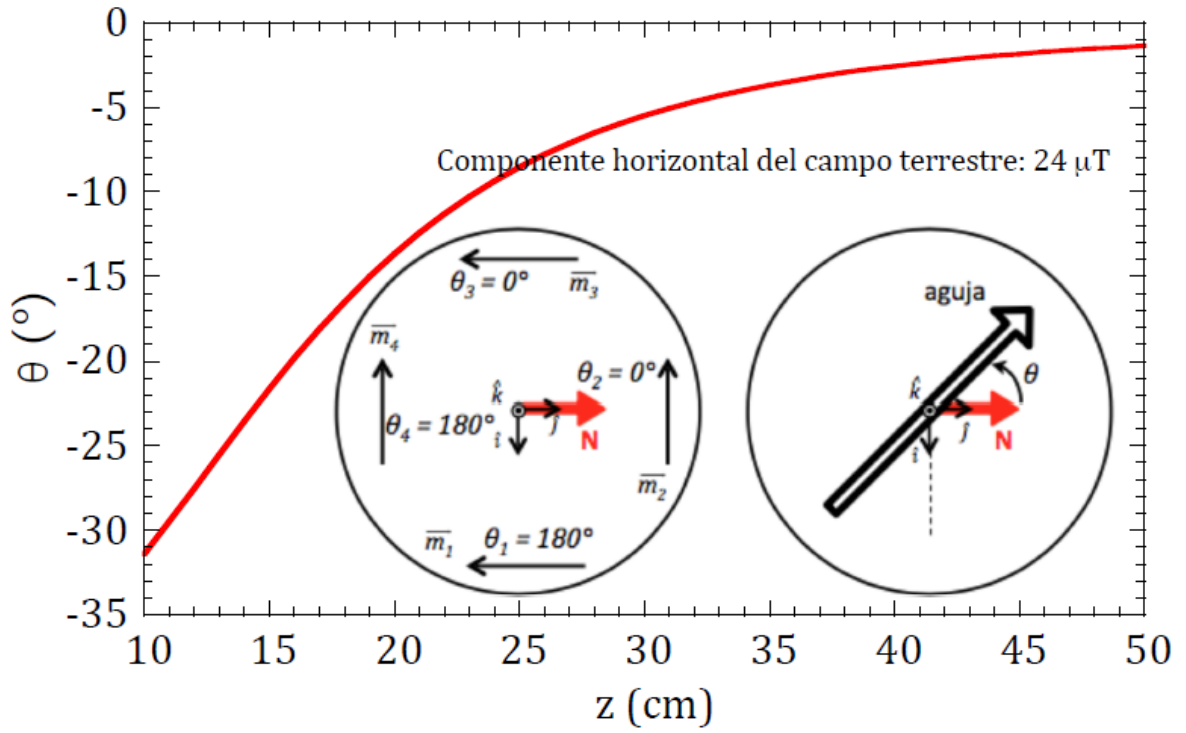
CASE 15



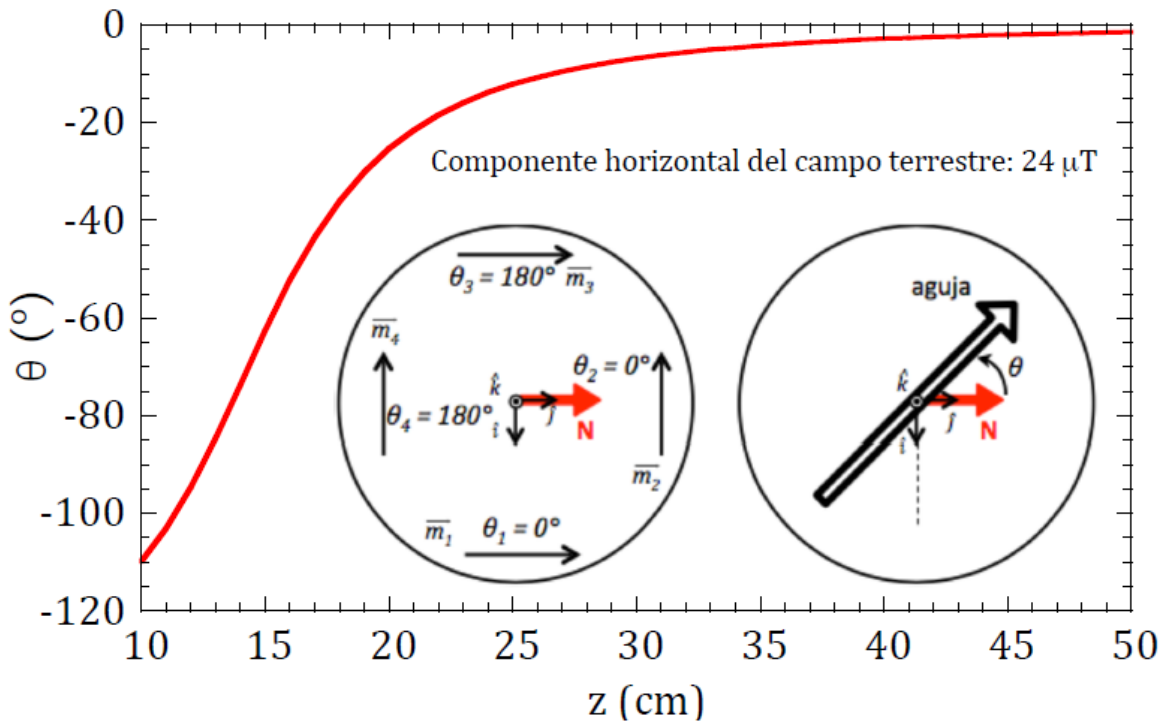
CASE 16



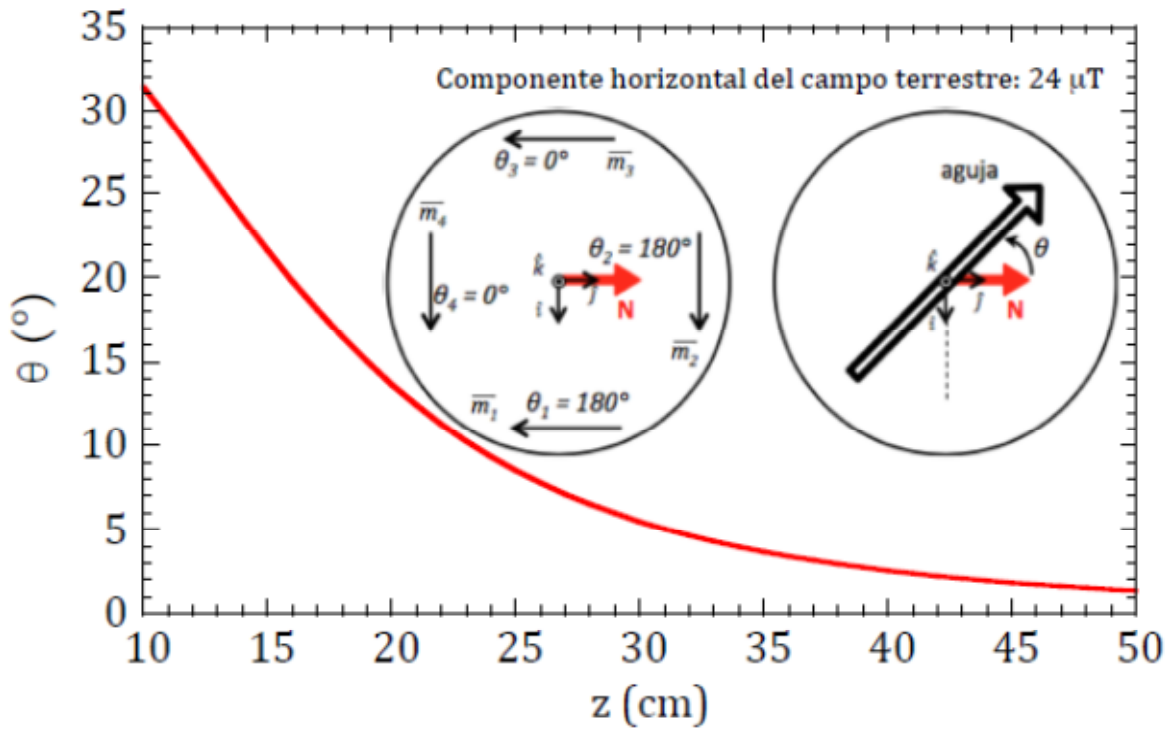
CASE 17



CASE 18



CASE 19



CASE 20

