

Análisis de la incidencia de los desvíos sextantal y octantal en el comportamiento de la aguja náutica

Trabajo de Final de Grado



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:
Conrad Guerra Piqué

Dirigido por:
Jorge Moncunill Marimón

Grado en Náutica y Transporte Marítimo

Barcelona, 10 de septiembre de 2020

Departament de Ciència i Enginyeria Nàutiques



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Facultat de Nàutica de Barcelona

Resumen

La aguja náutica es un instrumento que se lleva empleando durante cientos de años por su fiabilidad, sencillez y bajo coste, y es imprescindible para la navegación, ya que funciona sin energía eléctrica. Por este motivo, es obligatoria a bordo de todos los buques (SOLAS V19.2.1.1). Regularmente, se debe compensar (calibrar o ajustar) a fin de corregir los efectos perturbadores que generan en ella los hierros del buque, los cuales se denominan desvíos. La compensación viene regulada principalmente en la Resolución A.382(X) de la OMI, en el Anexo G de la Norma ISO 25862:2019, y a nivel español, en la Orden ministerial de 14 de diciembre de 1992. Este proceso de ajuste tiene gran importancia a la hora de considerar la aguja un elemento fiable para realizar una navegación segura. Sin embargo, cuando se ha realizado la compensación de una aguja, casi siempre quedan pequeños desvíos residuales.

Los desvíos que sufre la aguja a los diferentes rumbos pueden expresarse por medio de una serie de Fourier, de la cual, únicamente se suelen considerar los cinco primeros términos. El objetivo de este TFG es analizar la incidencia de los cuatro siguientes términos, llamados desvíos sextantal y octantal. Para ello, previamente, se realiza una breve descripción de la aguja náutica, de su historia y del magnetismo terrestre, así como una exposición más detallada de la teoría de la compensación. Finalmente, mediante el análisis de los desvíos residuales obtenidos en algunas compensaciones, se pretende conocer la incidencia que tienen los desvíos sextantal y octantal en la confección analítica de la curva (gráfica) de los desvíos residuales a los diferentes rumbos, a fin de poder ajustarla lo máximo posible al comportamiento real de la aguja.

Abstract

A magnetic compass is an instrument that has been used during centuries due to its reliability, simplicity and low cost, and it is essential for navigation, because it works without electrical power. For this reason, it is compulsory for all vessels (SOLAS V19.2.1.1). Regularly, magnetic compass must be adjusted in order to correct the perturbator effects that ship's irons generate on it, which are called deviations. Compass adjustment is regulated mainly by the IMO Resolution A.382(X) and Annex G of the ISO Standard 25862:2019, and in Spain, by the Ministerial Order of 14 December 1992. This adjustment has a great importance for considering a magnetic compass as a reliable element for the safety of navigation. However, when a compass adjustment has been carried out, almost always small residual deviations remain.

The deviations suffered by the compass to different courses can be expressed by means of a Fourier series, of which only the first five terms are usually considered. The objective of this bachelor's thesis is to analyze the incidence of the following four terms, denominated sextantal and octantal deviations. For this purpose, previously, a brief description of the magnetic compass, its history and the terrestrial magnetism is done, as well as a more detailed explanation of the theory of compass adjustment. Finally, through the analysis of the residual deviations obtained in some compass adjustments, it is intended to determine the incidence of the sextantal and octantal deviations have in the analytical creation of the residual deviations graphic (compass card), in order to adjust the compass card as much as possible to the real behaviour of the magnetic compass.

Tabla de contenidos

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
TABLA DE CONTENIDOS	III
LISTADO DE FIGURAS	VI
LISTADO DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN DEL COMPÁS MAGNÉTICO	1
1. RESUMEN HISTÓRICO DE LA AGUJA MAGNÉTICA	2
1.1. PRIMERAS UTILIZACIONES	2
1.2. EVOLUCIÓN HASTA LA ACTUALIDAD	2
1.3. HISTORIA DE LA ROSA DE LOS VIENTOS	3
1.4. DE COMPÁS MAGNÉTICO A BITÁCORA	5
1.5. TIPOS DE AGUJAS	8
2. MOMENTO MAGNÉTICO	9
3. MOMENTO DIRECTOR	9
CAPÍTULO 2. MAGNETISMO TERRESTRE	11
CAPÍTULO 3. MAGNETISMO DEL BUQUE	15
3.1 MAGNETISMO PERMANENTE	15
3.2 MAGNETISMO INDUCIDO	16
3.3 SIGNOS DE LOS IMANES P, Q Y R EN SUSTITUCIÓN DEL MAGNETISMO PERMANENTE	17
3.4 SIGNOS DE LOS COMPONENTES DEL MAGNETISMO INDUCIDO	18
CAPÍTULO 4. DESARROLLO Y EXPLICACIÓN DE LAS ECUACIONES EXACTA Y PRÁCTICA DEL DESVÍO	21
4.1 ECUACIÓN EXACTA DEL DESVÍO	21
4.2 ECUACIÓN APROXIMADA O PRÁCTICA DEL DESVÍO	24
CAPÍTULO 5. MÉTODO PARA REALIZAR LA COMPENSACIÓN PRELIMINAR Y CONFECCIÓN DE LA TABLILLA DE DESVÍOS RESIDUALES	26
5.1 COMPENSACIÓN	26
5.1.1 MOTIVOS PARA LA COMPENSACIÓN DE LA AGUJA	26

5.1.2 CORRECTORES USADOS PARA LA COMPENSACIÓN	27
5.2 DESVÍO DE ESCORA	28
5.3 COMPENSACIÓN PRELIMINAR	29
5.3.1 PROCEDIMIENTO PARA COMPENSAR	29
5.3.1.1 PREPARATIVOS	29
5.3.1.2 PRÁCTICA DE LA COMPENSACIÓN	31
5.3.1.3 ANÁLISIS DE LA COMPENSACIÓN	31
5.3.2 TABLILLA DE DESVÍOS RESIDUALES	33
CAPÍTULO 6. CLASIFICACIÓN DE LOS DESVÍOS	35
<hr/>	
6.1 FUERZAS PRODUCTORAS DEL DESVÍO	35
6.1.1 DESVÍO CONSTANTE	36
6.1.2 DESVÍO SEMICIRCULAR	36
6.1.3 DESVÍO CUADRANTAL	37
6.2 SUBDIVISIONES DEL DESVÍO	38
6.2.1 DESVÍO CONSTANTE	38
6.2.2 DESVÍO SEMICIRCULAR	39
6.2.3 DESVÍO CUADRANTAL	40
CAPÍTULO 7. DESARROLLO DE LA ECUACIÓN APROXIMADA DEL DESVÍO Y RELACIÓN CON SERIE DE FOURIER	41
<hr/>	
7.1 DESARROLLO DE LA ECUACIÓN APROXIMADA	41
7.2 RELACIÓN CON SERIE DE FOURIER	42
CAPÍTULO 8. DESVÍOS SEXTANTAL Y OCTANTAL	44
<hr/>	
CAPÍTULO 9. COMPARATIVA DE LAS TABLILLAS DE DESVÍOS OBTENIDAS ANALÍTICAMENTE SEGÚN LOS DESVÍOS Y LAS FÓRMULAS EMPLEADAS	46
<hr/>	
9.1 METODOLOGÍA	46
9.1.1 FÓRMULAS EMPLEADAS	47
9.2 BUQUE ALLURE OF THE SEAS	49
9.2.1 CASO 1: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA DEL DESVÍO CON EL D MEDIO	50
9.2.2 CASO 2: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL NE	51
9.2.3 CASO 3: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL SE	52
9.2.4 CASO 4: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL SW	53
9.2.5 CASO 5: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL NW	54
9.2.6 CASO 6: SE APLICA LA FÓRMULA COMPLETA CON LOS DESVÍOS SEXTANTAL Y OCTANTAL	55
9.3 BUQUE HÖEGH JACKSONVILLE	56
9.3.1 CASO 1: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA DEL DESVÍO CON D MEDIO	56

9.3.2 CASO 2: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL NE	57
9.3.3 CASO 3: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL SE	58
9.3.4 CASO 4: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL SW	59
9.3.5 CASO 5: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL NW	60
9.3.6 CASO 6: SE APLICA LA FÓRMULA COMPLETA CON LOS DESVÍOS SEXTANTAL Y OCTANTAL	61
9.4 YATE TALITHA	62
9.4.1 CASO 1: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA DEL DESVÍO CON D MEDIO	62
9.4.2 CASO 2: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL NE	63
9.4.3 CASO 3: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL SE	64
9.4.4 CASO 4: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL SW	65
9.4.5 CASO 5: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL NW	66
9.4.6 CASO 6: SE APLICA LA FÓRMULA COMPLETA CON LOS DESVÍOS SEXTANTAL Y OCTANTAL	67
9.5 YATE MAILYN IV	68
9.5.1 CASO 1: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA DEL DESVÍO CON D MEDIO	68
9.5.2 CASO 2: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL NE	69
9.5.3 CASO 3: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL SE	70
9.5.4 CASO 4: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL SW	71
9.5.5 CASO 5: SE APLICA LA FÓRMULA PRÁCTICA CON 5 RUMBOS: 4 CARDINALES Y EL CUADRANTAL NW	72
9.5.6 CASO 6: SE APLICA LA FÓRMULA COMPLETA CON LOS DESVÍOS SEXTANTAL Y OCTANTAL	73
9.6 GRÁFICAS	74
9.6.1 GRÁFICAS DEL BUQUE ALLURE OF THE SEAS	74
9.6.2 GRÁFICAS DEL BUQUE HÖEGH JACKSONVILLE	80
9.6.3 GRAFICAS DEL YATE TALITHA	86
9.6.4 GRAFICAS DEL YATE MAILYN IV	92
CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES	98
10.1 PRIMERA CONCLUSIÓN	98
10.2 SEGUNDA CONCLUSIÓN	98
10.3 TERCERA CONCLUSIÓN	98
10.4 CUARTA CONCLUSIÓN	99
10.5 QUINTA CONCLUSIÓN	99
BIBLIOGRAFÍA	100

Listado de Figuras

Figura 1. Carro magnético y disposición interior del indicador. Fuente: [10]	2
Figura 2. Primeros artificios ideados por navegantes para hallar el meridiano. Fuente:[10]	2
Figura 3. Aguja magnética, según Pedro de Maricourt (1269). Fuente: [10]	3
Figura 4. Grabado de la Torre de los Vientos debido a Julien David Le Roy (siglo XVIII). Fuente: [10].....	4
Figura 5. Detalle de la Rosa de los Vientos de un portulano. Fuente: WikiMedia	4
Figura 6. Aguja con los <i>imanes trocados</i> . Fuente: [10].....	5
Figura 7. Compas magnético usado siglo XVII. Fuente: [10]	5
Figura 8. Bitácora de mediados del siglo XVII. Fuente: [10]	6
Figura 9. Máquina magnética del doctor Gowin Knight para fabricación de imanes artificiales. Fuente: [10]	6
Figura 10. Compensador de Barlow. Fuente: [10].....	7
Figura 11. Compás de William Thomson 1882. Fuente: [10]	8
Figura 12. Flotador de una aguja líquida con 6 imanes en su interior. Fuente: [10].....	9
Figura 13. Par orientador de la aguja. Fuente: [3].....	10
Figura 14. Campo magnético terrestre. Fuente: [5].....	11
Figura 15. Diferencia entre el Nm y el Nv. Fuente: [5]	12
Figura 16. Carta isógona. Fuente: [10]	12
Figura 17. Componente fuerza F. Fuente: [5].....	13
Figura 18. Descomposición de la F. Fuente: [5].....	14
Figura 19. Magnetismo permanente con distintas proas en el hemisferio norte. Fuente: [4]	15
Figura 20. Magnetismo permanente vertical en el hemisferio norte. Fuente: [4]	16
Figura 21. Fuerzas generadas por el magnetismo inducido. Fuente: [4]	16
Figura 22. División de los 3 ejes de inducción en 9 varillas. Fuente: [4]	17
Figura 23. Imán permanente P. Fuente: [4]	17
Figura 24. Imán permanente Q. Fuente: [4].....	18
Figura 25. Imán permanente R. Fuente: [4]	18
Figura 26. Signo de la varilla a en función del rumbo del buque. Fuente: [6].....	18
Figura 27. Signo de la varilla c dependiendo del hemisferio donde se encuentre el buque. Fuente: [6] ..	19

Figura 28. Análisis de las varillas. Fuente: [4].....	20
Figura 29. Fuerzas al norte y al este. Fuente: [4]	21
Figura 30. Descomposición de F. Fuente: [4]	22
Figura 31. Bitácora. Fuente: [5].....	28
Figura 32. Certificado de compensación. Fuente: propia.	34
Figura 33. Tablilla y curva de desvíos correspondiente al certificado de la Figura 32. Fuente: propia.	34
Figura 34. Fuerzas productoras del desvío constante. Fuente: [3]	36
Figura 35. Fuerza productora del desvío cuadrantal. Fuente: [3]	37
Figura 36. Buque Allure of the Seas. Fuente: [13].....	49
Figura 37. Buque Höegh Jacksonville. Fuente: [13].....	56
Figura 38. Yate Talitha. Fuente: VesselFinder	62
Figura 39. Yate Mailyn IV. Fuente: VesselFinder	68
Figura 40. Curva de los desvíos residuales con el D medio (Allure of the Seas).	74
Figura 41. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Allure of the Seas).	75
Figura 42. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Allure of the Seas).	76
Figura 43. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Allure of the Seas).	77
Figura 44. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Allure of the Seas).	78
Figura 45. Curva de los desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Allure of the Seas).	79
Figura 46. Curva de los desvíos residuales con el D medio (Höegh Jacksonville).	80
Figura 47. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Höegh Jacksonville).....	81
Figura 48. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Höegh Jacksonville).....	82
Figura 49. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Höegh Jacksonville).....	83
Figura 50. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Höegh Jacksonville).....	84
Figura 51. Curva de los desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Höegh Jacksonville).	85

Figura 52. Curva de los desvíos residuales con el D medio (Talitha).....	86
Figura 53. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Talitha).	87
Figura 54. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Talitha).	88
Figura 55. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Talitha).	89
Figura 56. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Talitha).....	90
Figura 57. Curva de los desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Talitha).....	91
Figura 58. Curva de los desvíos residuales con el D medio (Mailyn IV).	92
Figura 59. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Mailyn IV).	93
Figura 60. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Mailyn IV).....	94
Figura 61. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Mailyn IV).	95
Figura 62. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Mailyn IV).	96
Figura 63. Curva de los desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Mailyn IV).	97

Listado de Tablas

Tabla 1. Posición de las esferas según el signo de los desvíos cuadrantales.	30
Tabla 2. Fuerzas productoras del desvío.	35
Tabla 3. Valores máximos y mínimos de la fuerza desviadora del desvío semicircular.	36
Tabla 4. Valores máximos y mínimos de la fuerza desviadora del desvío cuadrantal.	38
Tabla 5. Desvíos constante, semicircular y cuadrantal.	38
Tabla 6. Valores máximos y mínimos del desvío semicircular.	39
Tabla 7. Valores máximos y mínimos del desvío cuadrantal.	40
Tabla 8. Coeficientes de la segunda aproximación de la ecuación exacta del desvío.	43
Tabla 9. Desvíos iniciales (Allure of the Seas).	49
Tabla 10. Coeficientes con el D medio (Allure of the Seas).	50
Tabla 11. Desvíos residuales con el D medio (Allure of the Seas).	50
Tabla 12. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Allure of the Seas).	51
Tabla 13. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Allure of the Seas).	51
Tabla 14. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Allure of the Seas).	52
Tabla 15. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Allure of the Seas).	52
Tabla 16. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Allure of the Seas).	53
Tabla 17. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal al SW (Allure of the Seas).	53
Tabla 18. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Allure of the Seas).	54
Tabla 19. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Allure of the Seas).	54
Tabla 20. Coeficientes con los desvíos sextantal y octantal (Allure of the eas).	55
Tabla 21. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Allure of the Seas).	55
Tabla 22. Desvíos iniciales (Höegh Jacksonville).	56
Tabla 23. Coeficientes con el D medio (Höegh Jacksonville).	56
Tabla 24. Desvíos residuales con el D medio (Höegh Jacksonville).	57
Tabla 25. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Höegh Jacksonville).	57
Tabla 26. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Höegh Jacksonville).	58

Tabla 27. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Höegh Jacksonville).	58
Tabla 28. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Höegh Jacksonville).	58
Tabla 29. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Höegh Jacksonville).	59
Tabla 30. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal al SW (Höegh Jacksonville).	59
Tabla 31. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal al NW (Höegh Jacksonville).	60
Tabla 32. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Höegh Jacksonville).	60
Tabla 33. Coeficientes de los desvíos sextantal y octantal (Höegh Jacksonville).	61
Tabla 34. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Höegh Jacksonville).	61
Tabla 35. Desvíos iniciales (Talitha).	62
Tabla 36. Coeficientes con el D medio (Talitha).	62
Tabla 37. Desvíos residuales con el D medio (Talitha).	63
Tabla 38. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Talitha).	63
Tabla 39. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Talitha).	64
Tabla 40. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Talitha).	64
Tabla 41. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Talitha).	65
Tabla 42. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Talitha).	65
Tabla 43. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Talitha).	65
Tabla 44. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Talitha).	66
Tabla 45. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Talitha).	66
Tabla 46. Coeficientes con los desvíos sextantal y octantal (Talitha).	67
Tabla 47. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Talitha).	67
Tabla 48. Desvíos iniciales (Mailyn IV).	68
Tabla 49. Coeficientes con el D medio (Mailyn IV).	68
Tabla 50. Desvíos residuales con el D medio (Mailyn IV).	69
Tabla 51. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Mailyn IV).	69
Tabla 52. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Mailyn IV).	70
Tabla 53. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Mailyn IV).	70
Tabla 54. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Mailyn IV).	70
Tabla 55. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Mailyn IV).	71
Tabla 56. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Mailyn IV).	71
Tabla 57. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Mailyn IV).	72

Tabla 58. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Maily IV).....	72
Tabla 59. Coeficientes con los desvíos sextantal y octantal (Maily IV).....	73
Tabla 60. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Maily IV) .	73
Tabla 61. Desvíos residuales con el D medio (Allure of the Seas).....	74
Tabla 62. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Allure of the Seas).	75
Tabla 63. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal al SE (Allure of the Seas).	76
Tabla 64. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Allure of the Seas).....	77
Tabla 65. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Allure of the Seas).....	78
Tabla 66. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Allure of the Seas).	79
Tabla 67. Desvíos residuales con el D medio (Höegh Jacksonville).....	80
Tabla 68. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Höegh Jacksonville).	81
Tabla 69. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Höegh Jacksonville).	82
Tabla 70. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Höegh Jacksonville).	83
Tabla 71. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Höegh Jacksonville).....	84
Tabla 72. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Höegh Jacksonville).....	85
Tabla 73. Desvíos residuales con el D medio (Talitha).	86
Tabla 74. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Talitha).....	87
Tabla 75. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Talitha).	88
Tabla 76. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Talitha).....	89
Tabla 77. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Talitha).	90
Tabla 78. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desv sextantal y octantal (Talitha).....	91
Tabla 79. Desvíos residuales con el D medio (Maily IV).....	92
Tabla 80. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Maily IV).	93
Tabla 81. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Maily IV).	94
Tabla 82. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Maily IV).....	95
Tabla 83. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Maily IV.).....	96
Tabla 84. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Maily IV) .	97

Capítulo 1. Descripción del compás magnético

Descripción de la aguja náutica o compás magnético:

Un compás magnético consiste en unos pequeños imanes de forma cilíndrica (antiguamente eran parecidos a las agujas de coser; de ahí el nombre de aguja náutica), los cuales están unidos a una *rosa de los vientos* o *rosa náutica*, que es un disco graduado de 0 a 360 grados. El centro de la rosa se apoya en la punta de un eje vertical llamado *estilo*, el cual está fijo en la base de una caja cilíndrica llamada *mortero*. El mortero encierra el conjunto de estilo, rosa e imanes. Está hecho de un material no magnético, y su tapa superior es de cristal, a fin de poder ver la rosa. Como ya se ha indicado, normalmente el compás tiene más de un imán, a fin poder orientar la rosa más fácilmente, y todos ellos están sujetos en la parte inferior de la rosa. El centro de la rosa consiste en una hendidura hacia arriba en forma de cono, llamada *chapitel*, en cuyo interior, se coloca una piedra muy dura, que suele ser un rubí o un zafiro, para que el rozamiento con el estilo sea mínimo. Por el mismo motivo, la punta del estilo es muy afilada. Debido a que la rosa puede girar (al estar apoyada solo en su centro) se orienta en tierra en la dirección del meridiano magnético, formando con el meridiano geográfico o verdadero, el ángulo de la declinación magnética. No obstante, por causa de los hierros del buque, a bordo se orienta según una dirección llamada *norte de aguja*, la cual forma con el meridiano magnético, un ángulo llamado *desvío*. Asimismo, el mortero lleva una suspensión cardán para mantener la rosa horizontal, con independencia de los balances del buque. Esta suspensión también es el nexo de unión entre el mortero y la *bitácora*, armario donde están instalados los correctores del desvío. Las agujas náuticas han ido evolucionando durante los años. Hoy en día, los morteros están llenos de un líquido, que suele ser agua destilada con alcohol, para evitar la congelación en climas fríos, o un aceite ligero. También llevan un flotador en la parte central, en el interior del cual, se suelen alojar los imanes. Antiguamente, los morteros estaban vacíos, de manera que se habla de agujas líquidas y de agujas secas.¹

¹ Gaztelu-Iturri Leicea, R. (1999). *Compensación de la aguja náutica: curso de compensador*. Vitoria: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. ISBN 8445715070

1. Resumen histórico de la aguja magnética

1.1. Primeras utilizaciones²

Hacia el año 2600 a. C., el emperador Hoang Ti construyó un carro que llevaba una especie de aguja flotando libremente en el agua, y a esta aguja, estaba sujeta una figura que señalaba hacia el sur.

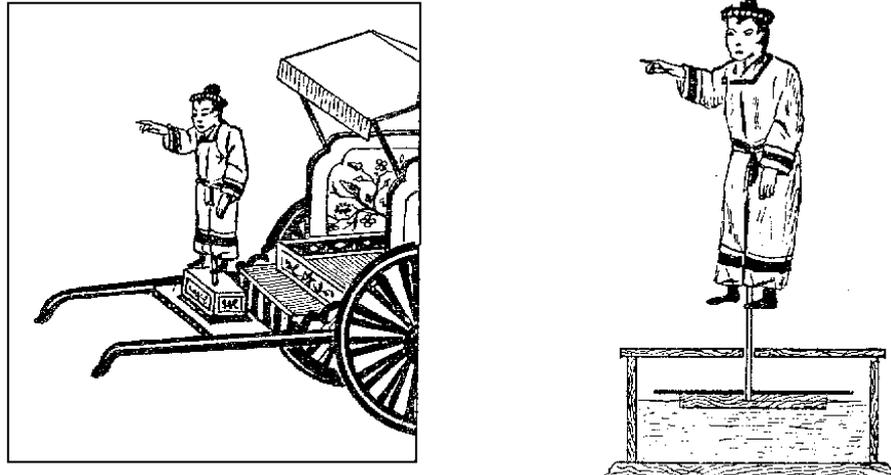


Figura 1. Carro magnético y disposición interior del indicador. Fuente: [10]

Se dice que en Japón ya conocían las agujas magnéticas debido a las arriesgadas expediciones que realizaban y que llegaron a América antes que nuestros antepasados.

1.2. Evolución hasta la actualidad³

Previamente a la aplicación del imán como método de orientación, la astronomía y la observación de las estrellas era el método más usual para orientarse en la mar. La forma alternativa era con un trozo de piedra imán, que se ponía encima de una madera, dentro de un recipiente con agua, y se dejaba hasta que dejara de moverse. Una vez en reposo, se podía determinar el eje longitudinal que señalaba, aproximadamente, la dirección norte-sur.



Figura 2. Primeros artificios ideados por navegantes para hallar el meridiano. Fuente:[10]

² Martínez-Lozares, A. et al. (2011). *La aguja magnética y su compensación: comportamiento de la aguja náutica*. Editorial Académica Española. ISBN-10: 3846565601; ISBN-13: 9783846565605

³ Martínez-Lozares, A. et al. (2011). *La aguja magnética y su compensación: comportamiento de la aguja náutica*. Editorial Académica Española. ISBN-10: 3846565601; ISBN-13: 9783846565605

Poco a poco, los métodos de orientación por imán fueron evolucionando hasta que al final del siglo XIII, ya era una práctica habitual entre navegantes del Mediterráneo. Apareció lo que se conoce como calamitas (flechas imantadas), de las cuales existían de varios tipos.

En 1269, Pedro el Peregrino de Maricourt montó sobre un pivote de metal una aguja magnética que podía girar libremente alrededor de sí misma. En un recipiente cilíndrico de cristal cuyo centro era atravesado por un eje de latón, con dos perforaciones en ángulo recto, siendo atravesado uno de ellos por la aguja de hierro imantada, indicadora de la línea norte-sur; y por el otro, una de plata o cobre que señalaba la línea este-oeste. Los cuatro puntos cardinales se marcaban en la tapa, y a su vez, los arcos comprendidos entre ellos se señalaban también con 9 divisiones, representando cada 10°. Sobre dicha tapa, una alidada permitía tomar ángulos azimutales.

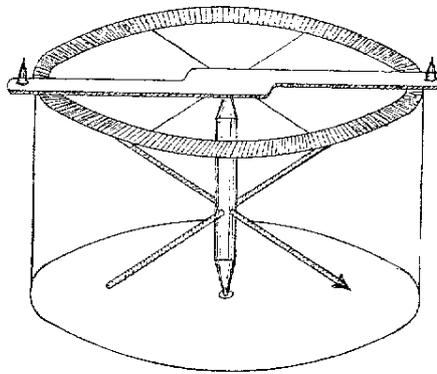


Figura 3. Aguja magnética, según Pedro de Maricourt (1269). Fuente: [10]

A finales del siglo XIII, se pegó un alambre trocado a un compás marino o rosa de los vientos de 32 puntos, llegando a ser la primicia del compás magnético.

1.3. Historia de la rosa de los vientos⁴

Como se ha comentado anteriormente, los navegantes antiguamente se fijaban en las estrellas y en el sol para orientarse en el mar. Pero en condiciones meteorológicas que dificultaban ese tipo de navegación, se guiaban mediante el viento.

⁴ Martínez-Lozares, A. et al. (2011). *La aguja magnética y su compensación: comportamiento de la aguja náutica*. Editorial Académica Española. ISBN-10: 3846565601; ISBN-13: 9783846565605



Figura 4. Grabado de la Torre de los Vientos debido a Julien David Le Roy (siglo XVIII). Fuente: [10]

Los griegos fueron los primeros en diferenciar ocho tipos de viento, empezando desde el norte y en sentido de las agujas del reloj: Bóreas, Kaikias, Apeliotes, Euros, Notos, Lips, Céfiro y Skiron. Durante una época, estos términos fueron usados por todo el Mediterráneo. Posteriormente, la política cogió fuerza en Italia, y estos términos pasaron a ser los siguientes: Tramontana, Greco, Levante, Sirocco, Mezzodi, Libeccio, Ponente y Maestro.

Estos nombres se arraizaron en todo el Mediterráneo, y poco a poco pasaron de ser 8 vientos a 16, las 8 principales más 8 intermedias. La primera carta donde aparece una rosa de los vientos es la Pisana. En ella, se ven dos grandes círculos, y dieciséis líneas salen del centro, y al llegar a la circunferencia, las líneas regresan como si fueran reflejados. El círculo resultante y sus dieciséis puntas recuerdan una flor con pétalos.



Figura 5. Detalle de la Rosa de los Vientos de un portulano. Fuente: Wikimedia

Con el tiempo, de los dieciséis rumbos se pasaron a 32. En la actualidad, esos 32 puntos han sido remplazados por el sistema sexagesimal de 360°.

1.4. De compás magnético a bitácora⁵

Sobre el 1519, o posiblemente antes del descubrimiento de América, era costumbre el colocar imanes debajo de la rosa, con un determinado ángulo con la línea norte-sur. La función de esos imanes era corregir de forma permanente el desvío. Las agujas de este tipo se decía que llevaban *imanes trocados*.

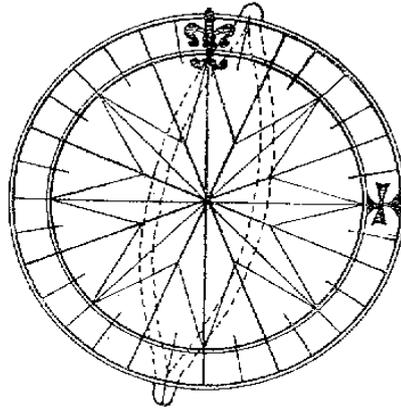


Figura 6. Aguja con los *imanes trocados*. Fuente: [10]

Las piezas imantadas o planchas, solían tener forma triangular o elíptica, como se muestra en la Figura 6. Se colocaban en ángulo recto en los extremos norte-sur.

Al mismo tiempo, Girolamo Cardano (1501-1576) creó la llamada suspensión cardan, que más adelante supondría también la base del giroscopio. Esta suspensión consiste en mantener el compás siempre horizontal aun con balanceos, mediante unos anillos diametralmente opuestos.

El compás magnético usado durante el siglo XVII constaba de una caja de madera redonda con un cristal en la parte superior. Dentro de esta caja, se encontraba la rosa, y fijados en la parte inferior, los imanes. La caja estaba sujeta a un aro, de manera que quedaba suspendida horizontalmente dentro de un aro de latón. Así, aunque el barco sufriera balanceos, esta se mantenía horizontal.

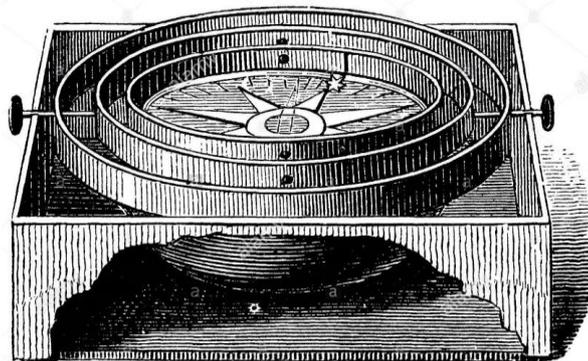


Figura 7. Compas magnético usado siglo XVII. Fuente: [10]

⁵ Martínez-Lozares, A. et al. (2011). *La aguja magnética y su compensación: comportamiento de la aguja náutica*. Editorial Académica Española. ISBN-10: 3846565601; ISBN-13: 9783846565605

La primera evidencia de una bitácora se encuentra en 1643, donde Jorge Fournier habla de una especie de armario situado al pie del palo de mesana, dividido en tres compartimentos, llamado bitácora. A partir de ese momento, se fue avanzando en la idea de la bitácora, hasta que, en el siglo XVIII, empieza la fabricación de imanes artificiales, y la discusión sobre métodos y clases de aceros y formas de los imanes que se colocan en la rosa. Tras muchas investigaciones, la gran mayoría se decantaría por planchuelas rectas.

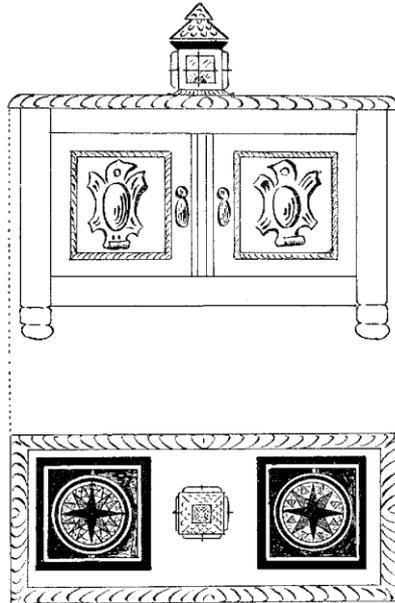


Figura 8. Bitácora de mediados del siglo XVII. Fuente: [10]

Otro invento destacable y que ayudó a la creación de imanes artificiales, fue la máquina diseñada por el médico Gowin Knight (1713-1772). El aparato consistía en dos carros de más de 200 kg cada uno, cada uno de ellos tenía 240 imanes de barra. La imantación consistía en colocar una barra de acero o aguja de compás entre ambas, y esto provocaba una imantación más fuerte que cualquier imán creado con métodos antiguos.

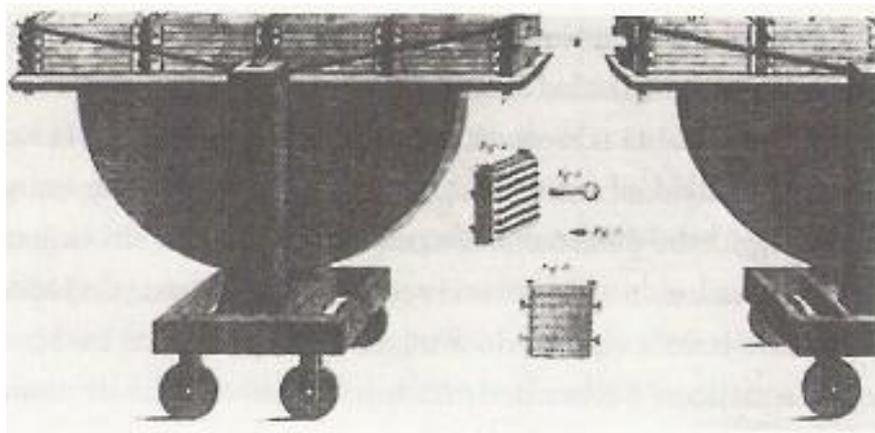


Figura 9. Máquina magnética del doctor Gowin Knight para fabricación de imanes artificiales. Fuente: [10]

Fue a partir del siglo XIX que se empezó a utilizar el hierro como estructura para los barcos, con el problema que eso conllevaba, ya que el metal perturbaba la aguja. En ese momento, las investigaciones se centraron en descubrir un método para corregir este error. En 1824, Peter Barlow incorporó a la bitácora lo que se llamó *platillo corrector* para compensar el desvío. Esta incorporación consistía en dos placas de hierro, separadas por otra de madera, formando las tres un disco atravesado por un eje de cobre perpendicular a una de las caras de la bitácora. Este eje estaba sujeto a una pieza de madera que permitía subirlo o bajarlo por una especie de ventana.

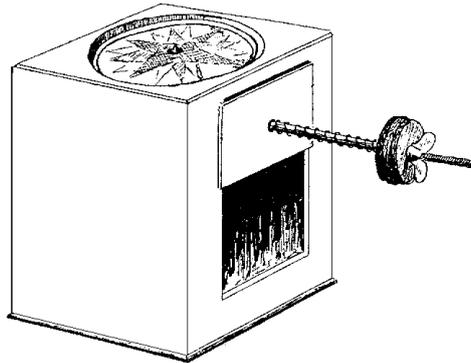


Figura 10. Compensador de Barlow. Fuente: [10]

La bitácora tenía movimiento alrededor de un eje vertical, y puesto que el platillo corrector podía acercarse o alejarse de la aguja corriendo a lo largo de su eje, obtuvo un compensador con tres movimientos respecto a la rosa: en altura, en distancia y a su alrededor.

Las mejoras y los inventos no cesaron, y entre 1837 y 1840, William Scoresby (1789-1857) mejoró la aguja, creando la denominada *aguja magistral*. Sus características principales fueron:

- Un mortero de cobre que permitía aminorar las oscilaciones de la rosa.
- La rosa estaba constituida por cuatro barritas de acero fuertemente imantadas
- Debajo del chapitel, se encontraba una piedra de ágata o un rubí

William Thomson, conocido también como Lord Kelvin, dio un paso más allá y creó un compás mucho más preciso, con una bitácora que incorporaba esferas compensadoras de hierro dulce, imanes internos ajustables y la barra de Flinders.



Figura 11. Compás de William Thomson 1882. Fuente: [10]

1.5. Tipos de agujas⁶

Con el tiempo, se afianzó la bitácora de Thomson, que es el modelo que se sigue empleando hoy día en los compases magistrales, aunque con algunas modificaciones, como la introducción del alumbrado eléctrico o el uso de materiales plásticos. En cuanto al mortero, Thomson lo dejó vacío, pero posteriormente, se llenó, surgiendo así dos grandes tipos de agujas: las secas y las líquidas.

- Agujas secas:

En este tipo de compás, el mortero está cerrado herméticamente, y el objetivo principal es que la rosa pese muy poco, ya que eso aporta una mayor sensibilidad.

- Agujas líquidas:

A medida que la velocidad de los buques fue aumentando, se observó que las agujas secas eran demasiado inestables. La implementación de las agujas líquidas permitió aumentar la estabilidad, ya que, a estas, le afectan menos las trepidaciones debidas al aumento de la velocidad de los buques y al uso de motores diésel.

⁶ Martínez-Lozares, A. et al. (2011). *La aguja magnética y su compensación: comportamiento de la aguja náutica*. Editorial Académica Española. ISBN-10: 3846565601; ISBN-13: 9783846565605

Hay varios tipos de agujas de líquidas, pero la característica principal que deben de cumplir, es que el centro de gravedad de la rosa debe encontrarse por debajo de su centro de suspensión, a fin de garantizar su estabilidad. La rosa también lleva un flotador en su parte central, el cual tiene por objetivo disminuir el rozamiento entre el estilo y el chapitel. Además, en el interior del flotador, se alojan los imanes.

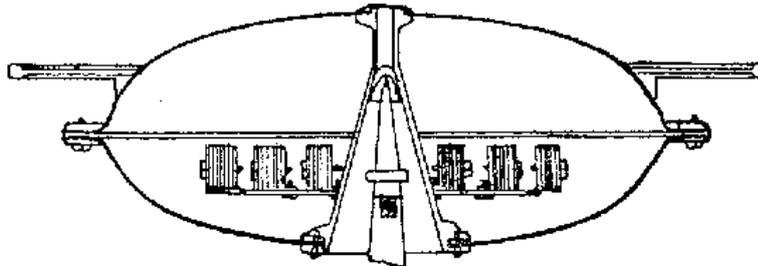


Figura 12. Flotador de una aguja líquida con 6 imanes en su interior. Fuente: [10]

2. Momento magnético⁷

El momento magnético (M) de un imán es el producto de la masa magnética (m) de uno de sus polos por la distancia (d) entre ambos polos del imán.

$$M = m \cdot d$$

En las rosas con sistemas de imanes múltiples, el momento magnético es la suma de los momentos de cada imán.

El momento magnético es la magnitud que indica la *cantidad de magnetismo* que posee un imán. Se puede expresar gráficamente como un vector paralelo al eje del imán, dirigido del polo azul al rojo, y de un tamaño proporcional a su valor.

3. Momento director⁸

El componente horizontal del magnetismo terrestre, H , actúa sobre cada polo de la aguja con una fuerza $m \cdot H$, que referida a la dirección perpendicular al imán, H_1 (ver la Figura 13), tiene por expresión:

$$m \cdot H_1 = m \cdot H \cdot \sin \alpha$$

Por tanto, siendo d la distancia entre los dos polos de la aguja, el par orientador o momento director (G) tiene como expresión:

$$G = m \cdot H_1 \cdot d = m \cdot d \cdot \sin \alpha = M \cdot H \cdot \sin \alpha$$

⁷ Gaztelu-Iturri Leicea, R. (1999). *Compensación de la aguja náutica: curso de compensador*. Vitoria: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. ISBN 8445715070

⁸ Moréu Curbera; Martínez Jiménez (1987). *Astronomía y navegación. Tomo III: curso de capitanes*. 3ª ed. Vigo: los autores. Capítulos LXIX–LXXX (pp. 60–206), pp. 329–330. ISBN 8485645014

La aceleración angular de la aguja (ω) es el cociente del momento director (G) y el momento de inercia (I):

$$\omega = \frac{G}{I} = \frac{m \cdot I \cdot H \cdot \text{sen} \alpha}{I}$$

La orientación de la aguja será más rápida cuanto más grande sea el momento magnético y el componente H, mientras que el momento de inercia debe ser pequeño.

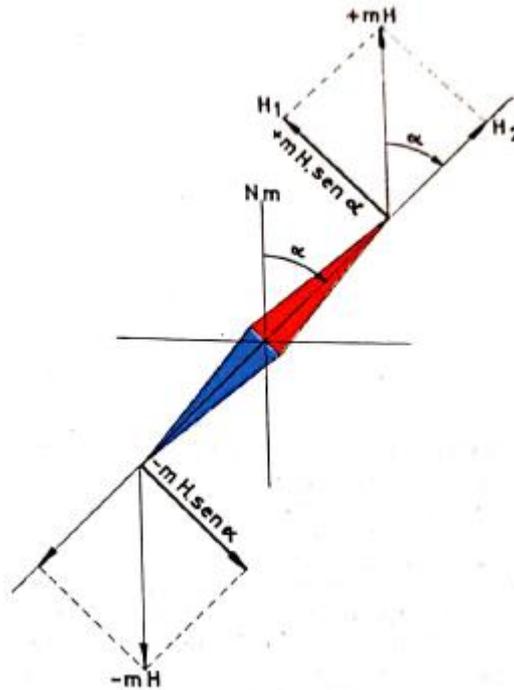


Figura 13. Par orientador de la aguja. Fuente: [3]

Conforme la aguja se acerca al meridiano, disminuye α , y al mismo tiempo, el valor de G, hasta que, en un instante determinado, el momento director será igual al momento resistente (R.) Esta posición de equilibrio tendrá lugar con un ángulo β . Entonces,

$$m \cdot I \cdot H \cdot \text{sen} \beta = R$$

Y por tanto,

$$\text{sen} \beta = R / (m \cdot I \cdot H)$$

Esta expresión está relacionada con la sensibilidad de la aguja, que es la característica de acusar los cambios de rumbo. Cuanto menor sea β , mayor será la sensibilidad de la aguja, para lo cual, la resistencia debe de ser mínima y el momento magnético grande.

Capítulo 2. Magnetismo terrestre

El magnetismo terrestre es la acción que ejerce el campo magnético de nuestro planeta. La Tierra se comporta como si fuera un imán gigantesco, el cual afecta a las agujas imantadas, dirigiéndolas en la dirección norte-sur, mientras tengan libertad de movimiento. En la actualidad, aún se desconoce el origen del campo magnético. Las dos hipótesis más aceptadas son las de Elzasser y Frenkel. Las dos se diferencian poco entre ellas, y creen que el núcleo de la Tierra ha de tener un parte de masa metálica líquida, de manera que un calentamiento de esta masa podría provocar unas corrientes de convección. Dichas convecciones y la rotación de la Tierra podrían crear corrientes eléctricas, y por tanto, un campo magnético asociado a ellas.

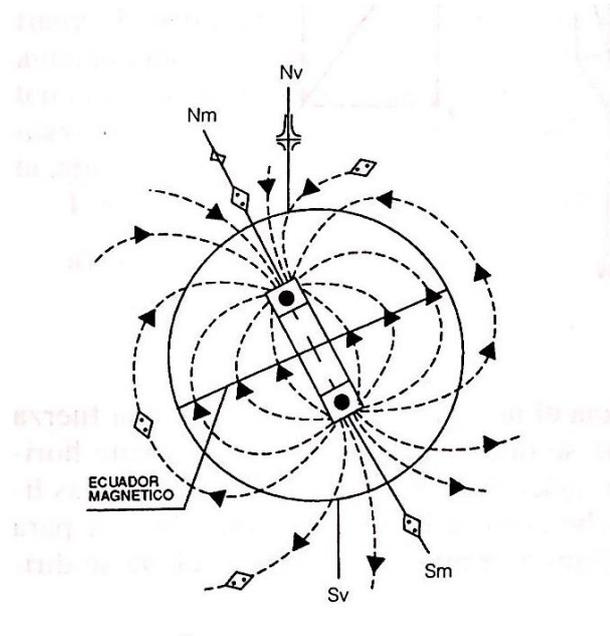


Figura 14. Campo magnético terrestre. Fuente: [5]

Los polos magnéticos no coinciden con los polos geográficos, y además, se van desplazando lentamente, variando su posición a lo largo del tiempo. Su intensidad también varía con el tiempo. Asimismo, las líneas de fuerza del campo magnético terrestre determinan el meridiano magnético en cada lugar. El ángulo entre el meridiano geográfico y el magnético se denomina declinación magnética o variación local, puesto que va cambiando con la situación geográfica. Si el norte magnético (Nm) está al este del norte verdadero (Nv), la declinación magnética es positiva, mientras que, si el Nm está al oeste del Nv, es negativa.

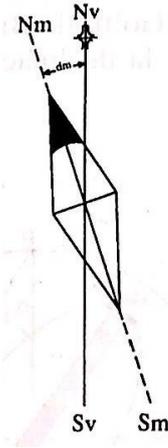


Figura 15. Diferencia entre el Nm y el Nv. Fuente: [5]

El valor de la declinación magnética en los diferentes puntos de la Tierra se representa en unas cartas llamadas isógonas. En ellas, están trazadas las líneas isógonas, las cuales unen los puntos que tienen la misma declinación magnética, siendo la línea agónica la que une los puntos en que el valor de la declinación magnética es cero. Asimismo, hay otras cartas magnéticas, como las isóclinas, que unen los puntos con la misma inclinación magnética, siendo el ecuador magnético donde la aguja tiene una inclinación de cero, o las cartas isodinámicas, que unen los puntos con igual intensidad del campo magnético terrestre, pudiendo ser la intensidad total (F), el componente horizontal (H) o el componente vertical (Z), los cuales se explican más adelante.⁹

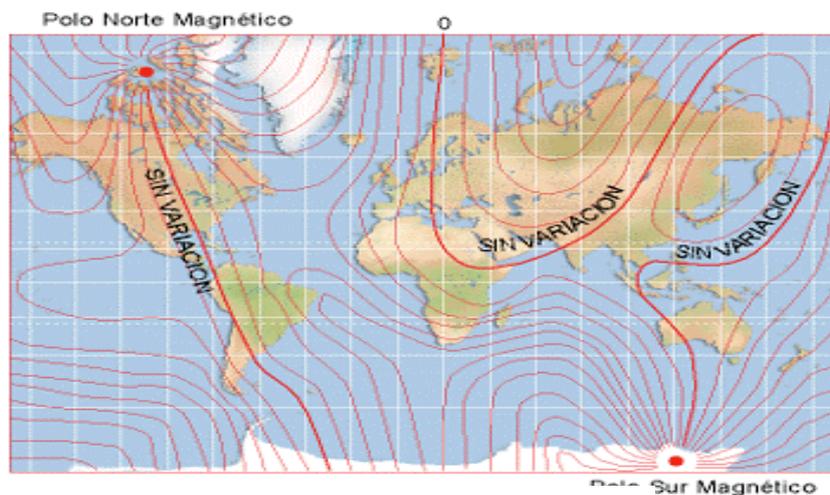


Figura 16. Carta isógona. Fuente: [10]

En las cartas náuticas en formato papel, se encuentra la rosa de la declinación magnética, donde figura su valor para las diferentes partes del área geográfica que representa la carta. Además, también se

⁹ Martínez-Lozares, A. et al. (2011). *La aguja magnética y su compensación: comportamiento de la aguja náutica*. Editorial Académica Española. ISBN-10: 3846565601; ISBN-13: 9783846565605

indican los rumbos magnéticos. Estos valores corresponden al año de la edición de la carta. Junto al valor de la declinación magnética, también figura la variación anual, expresada en minutos y segundos.

Actualmente, dicha variación se indica con su signo o denominación (E +; W -). Antiguamente, se expresaba por incremento o decremento del valor absoluto de la declinación magnética. En cualquier caso, se debe actualizar el valor de la declinación magnética para el año en curso. Asimismo, se debe tener en cuenta que solo se puede trabajar directamente con los rumbos magnéticos trazados en la carta, si no han transcurrido muchos años desde la edición de la carta. Hoy día, la declinación magnética se obtiene también en el ECDIS y en ciertas páginas web de algunos Estados. En el ECDIS, si se usa el compás magnético como indicador principal de rumbo, la indicación de *heading* (HDG) corresponde al rumbo de aguja corregido automáticamente por la declinación magnética, o manualmente por la corrección total.

Por la atracción terrestre, el Na (norte de aguja), es atraído hacia el Nm (norte magnético), con una fuerza F que es la intensidad del campo magnético (considerando el polo de la aguja como unidad de masa magnética). Esta fuerza se puede descomponer en un componente horizontal (H) y en un componente vertical (Z). Asimismo, θ es la inclinación magnética, también llamada latitud magnética, la cual adquiriría la aguja si esta pudiera oscilar verticalmente (lo cual no sucede en las agujas líquidas actuales).

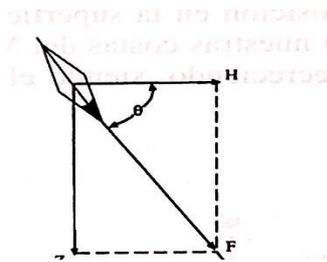


Figura 17. Componente fuerza F . Fuente: [5]

De la Figura 17, se desprenden las siguientes relaciones:

$$H = F \cdot \cos \theta \quad Z = F \cdot \sin \theta \quad \tan \theta = Z / H$$

El componente H es el que orienta la aguja. Sin embargo, tanto el componente H , como el Z , inducen los hierros dulces del buque, lo cual se analizará en el siguiente capítulo. Por tanto, al estudiar la compensación de agujas náuticas, interesa descomponer el componente H según los dos ejes propios del buque: el eje longitudinal (proa-popa) y el transversal, o lo que es lo mismo, la fuerza F en los tres ejes propios del buque: longitudinal (X), transversal (Y) y vertical (Z).

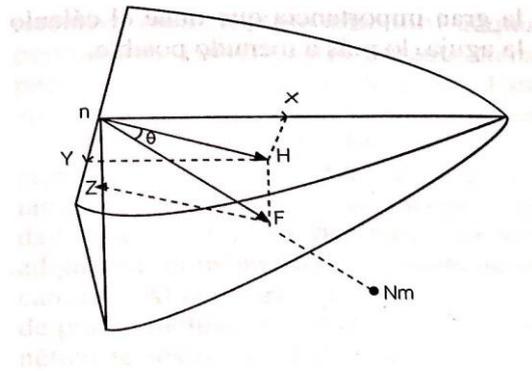


Figura 18. Descomposición de la F. Fuente: [5]

En el ecuador magnético, Z y θ son nulos, pero no por ello, H adquiere su máximo valor. Asimismo, el máximo valor de F y de Z se encuentra en los polos magnéticos, pero en ellos y en sus inmediaciones, la aguja magnética no es utilizable, ya que H es nulo o muy pequeño. Decir, por último, que el campo magnético terrestre sufre ciertos cambios, que son:

- Cambios seculares:

Son la variación del valor que experimenta cualquier elemento promedio del campo magnético terrestre a lo largo del tiempo. Se trata de cambios muy lentos. El más importante para los navegantes es la declinación magnética.

- Cambios periódicos:

Son pequeñas variaciones diarias debidas a la influencia del Sol y de la Luna. También se pueden considerar las alteraciones producidas por las tormentas magnéticas. Excepto cerca de los polos, tienen escaso valor, y por ello, no se consideran en la navegación.

- Cambios irregulares:

Se trata de variaciones magnéticas provocadas principalmente por la naturaleza magnética de algunos fondos marinos.¹⁰

¹⁰ Martínez-Lozares, A. et al. (2011). *La aguja magnética y su compensación: comportamiento de la aguja náutica*. Editorial Académica Española. ISBN-10: 3846565601; ISBN-13: 9783846565605

Capítulo 3. Magnetismo del buque

El componente horizontal del campo magnético dirige la aguja hacia el Nm. No obstante, hay otros campos magnéticos que también afectan a la aguja, los cuales crean los desvíos.

Durante la construcción de un buque, los aceros usados son susceptibles a una imantación por parte del campo magnético terrestre. Depende de la composición de estos hierros, el magnetismo adquirido puede ser:

- Permanente: el que adquieren los hierros duros, que son los ricos en carbono.
- Accidental o inducido: el que adquieren hierros dulces, pobres en carbono.¹¹

3.1 Magnetismo permanente¹²

El magnetismo permanente del buque se adquiere durante la construcción del mismo. Las presiones y soldaduras a las que se someten los hierros duros provocan que las planchas ricas en carbono adquieran una imantación progresiva según su orientación dentro del campo magnético terrestre.

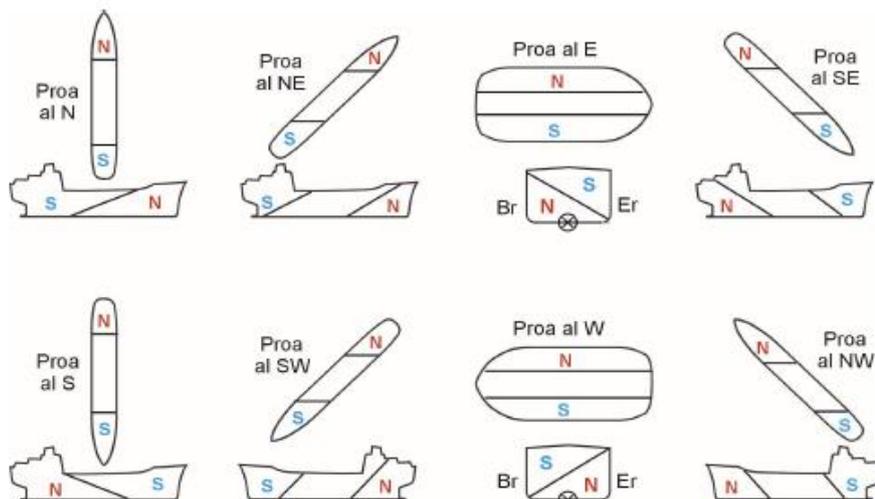


Figura 19. Magnetismo permanente con distintas proas en el hemisferio norte. Fuente: [4]

¹¹ Gonzalez La Flor, F. (2016). *Magnetismo a bordo y compensación de agujas náuticas*. Facultat de Nàutica de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya

¹² Gonzalez La Flor, F. (2016). *Magnetismo a bordo y compensación de agujas náuticas*. Facultat de Nàutica de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya

En los buques construidos en el hemisferio norte, se observa que: a los rumbos N, NE y NW, los nortes están a proa y los sures están a popa; a los rumbos NE, E y SE, los nortes queden a babor y los sures a estribor, y los nortes quedan en la quilla y los sures en cubierta. En el hemisferio sur, las polaridades son las opuestas. Hoy día, se construyen buques por secciones, de manera que lo expuesto, en lugar de ser para todo el buque, es para cada sección.

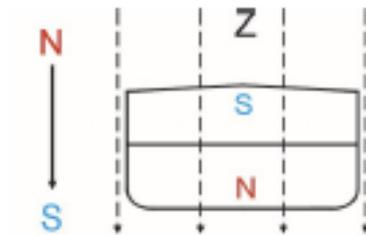


Figura 20. Magnetismo permanente vertical en el hemisferio norte. Fuente: [4]

El imán resultante, bien sea de todo el buque o la suma de los imanes correspondientes a cada sección, se puede expresar como tres imanes según los ejes propios del buque: uno longitudinal (P), otro transversal (Q) y otro vertical (R). Cada uno de estos imanes ejerce una fuerza sobre la aguja.

3.2 Magnetismo inducido

El magnetismo inducido es el producido por la imantación de los hierros dulces según su orientación en el campo magnético terrestre. Se diferencia del permanente por su intensidad variable. La fuerza resultante también se descompone según los ejes propios del buque en los componentes X, Y y Z.

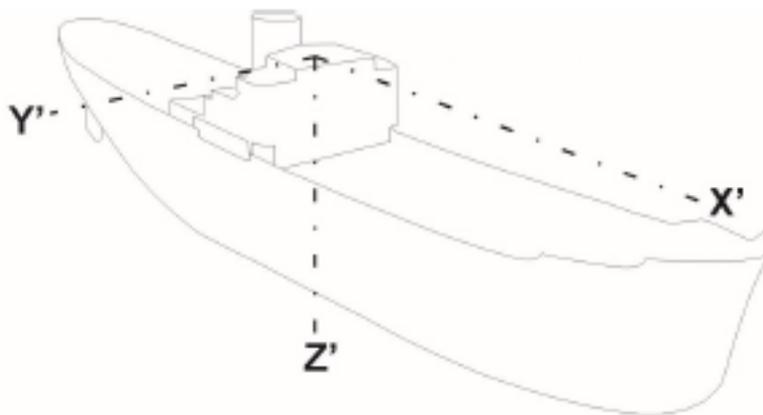


Figura 21. Fuerzas generadas por el magnetismo inducido. Fuente: [4]

Así como el efecto de los hierros duros se puede sustituir por tres imanes, el efecto de los hierros dulces se puede sustituir por las siguientes 9 varillas.

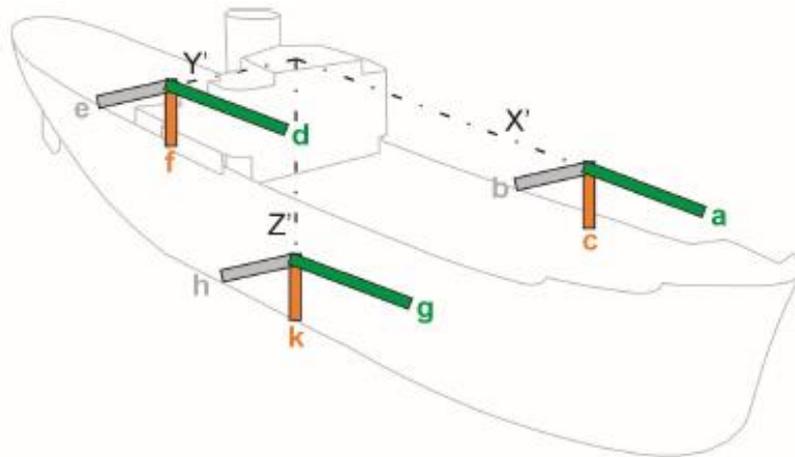


Figura 22. División de los 3 ejes de inducción en 9 varillas. Fuente: [4]

Las varillas a, e y k se denominan varillas simétricas, ya que se inducen y afectan sobre el mismo eje. En cambio, las demás reciben el nombre de asimétricas, puesto que se inducen sobre un eje, pero afectan a otro. Así por ejemplo, la varilla b se induce transversalmente, pero crea un polo magnético sobre el eje longitudinal.

3.3 Signos de los imanes P, Q y R en sustitución del magnetismo permanente ¹³

Se consideran positivos los sentidos hacia proa, estribor y abajo; mientras que los sentidos hacia popa, babor y arriba son negativos. Estos sentidos se refieren siempre con respecto a la aguja. El motivo de estos criterios visualiza en las Figuras 23, 24 y 25.

El imán P es positivo cuando la aguja tiende a ir hacia proa, y negativo en el caso contrario. El buque de la izquierda navega al rumbo magnético 090°, pero su rumbo de aguja es menor de 90°, y por tanto, el desvío es positivo ($\Delta = R_m - R_a > 0$). En cambio, en el buque de la derecha, el rumbo magnético es el 090°, pero el rumbo de aguja es mayor de 90°, siendo por tanto, el desvío negativo ($\Delta = R_m - R_a < 0$).



Figura 23. Imán permanente P. Fuente: [4]

¹³ Gonzalez La Flor, F. (2016). *Magnetismo a bordo y compensación de agujas náuticas*. Facultat de Nàutica de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya

El imán Q es positivo cuando la aguja tiende a ir hacia a estribor y negativo en el sentido opuesto.

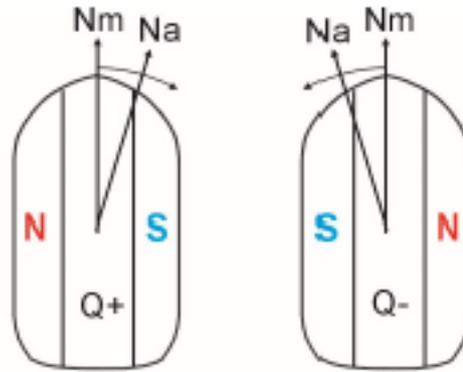


Figura 24. Imán permanente Q. Fuente: [4]

Por último, el imán R es positivo cuando la aguja se desvía hacia la quilla y negativo en el caso contrario.

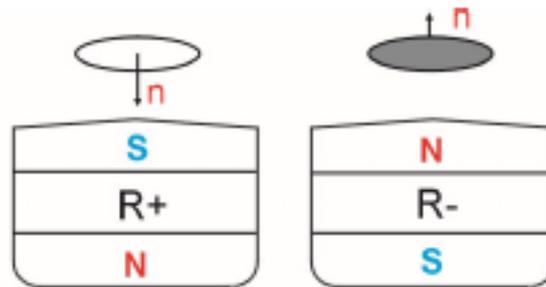


Figura 25. Imán permanente R. Fuente: [4]

3.4 Signos de los componentes del magnetismo inducido¹⁴

La polaridad y la intensidad de las varillas horizontales (a, e, de, g, h) dependen del rumbo del buque, mientras que la polaridad y la intensidad de las varillas verticales (c, f, k) dependen del hemisferio.

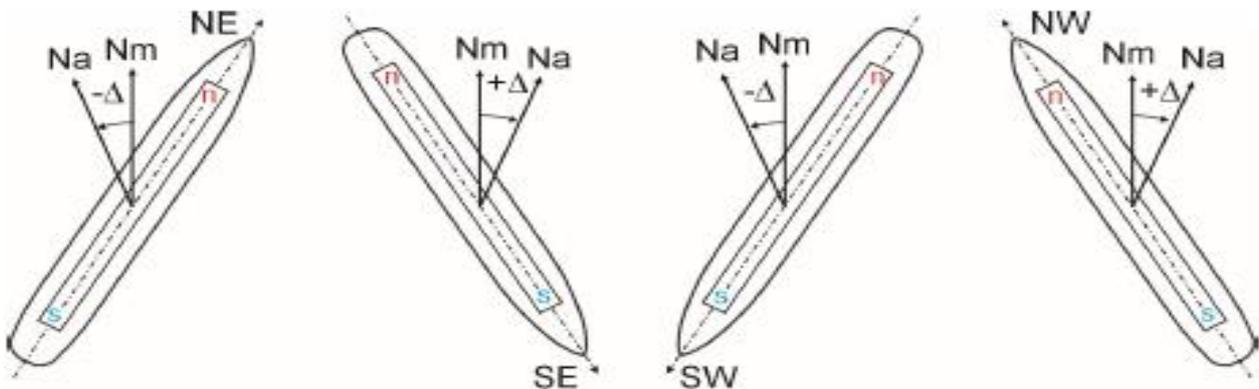


Figura 26. Signo de la varilla a en función del rumbo del buque. Fuente: [6]

¹⁴ Moyano Sanz, S. (2009). *Apuntes de compensación de agujas náuticas*. Facultat de Nàutica de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya

Se observa como los desvíos producidos por la varilla **a** son negativos en los rumbos del primer y tercer cuadrantes, y positivos en los del segundo y cuarto cuadrantes. Asimismo, al norte y al sur magnéticos, la inducción es máxima, pero no se produce desvío; mientras que, al este y al oeste, la varilla no se induce, y, por tanto, tampoco crea ningún desvío. Los desvíos producidos por la varilla **a**, y en general, por las varillas horizontales, se anulan y cambian de signo cada 90°.

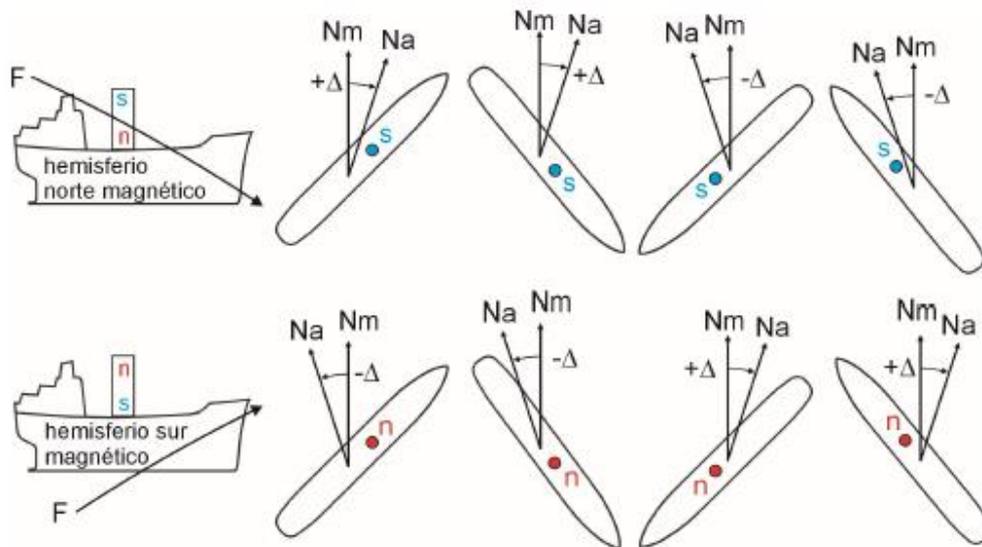


Figura 27. Signo de la varilla **c** dependiendo del hemisferio donde se encuentre el buque. Fuente: [6]

La varilla **c** está inducida por el componente vertical del campo magnético terrestre, creando un polo magnético sobre el eje longitudinal del buque. Su intensidad es mayor cuanto más cerca esté el buque de los polos magnéticos, y nula cuando el buque está en el ecuador magnético. Como se muestra en la Figura 27, su polaridad cambia con el hemisferio. Asimismo, al norte y al sur magnéticos, no produce desvío; mientras que al este y al oeste magnético, el desvío que provoca es máximo. A los rumbos de los cuadrantes primero y segundo, el desvío tiene el mismo signo, que es el opuesto al de los cuadrantes tercer y cuarto. Los desvíos producidos por la varilla **c**, y en general, por las varillas verticales, se anulan y cambian de signo cada 180°.

Haciendo un análisis de cada una de las varillas, se obtiene el signo de cada una de ellas. El resultado se visualiza en la Figura 28. El signo de las varillas simétricas depende de si estas son corridas o discontinuas. Por su parte, las varillas asimétricas siempre son discontinuas, y su signo depende de en cuál de sus dos posibles posiciones se encuentren.

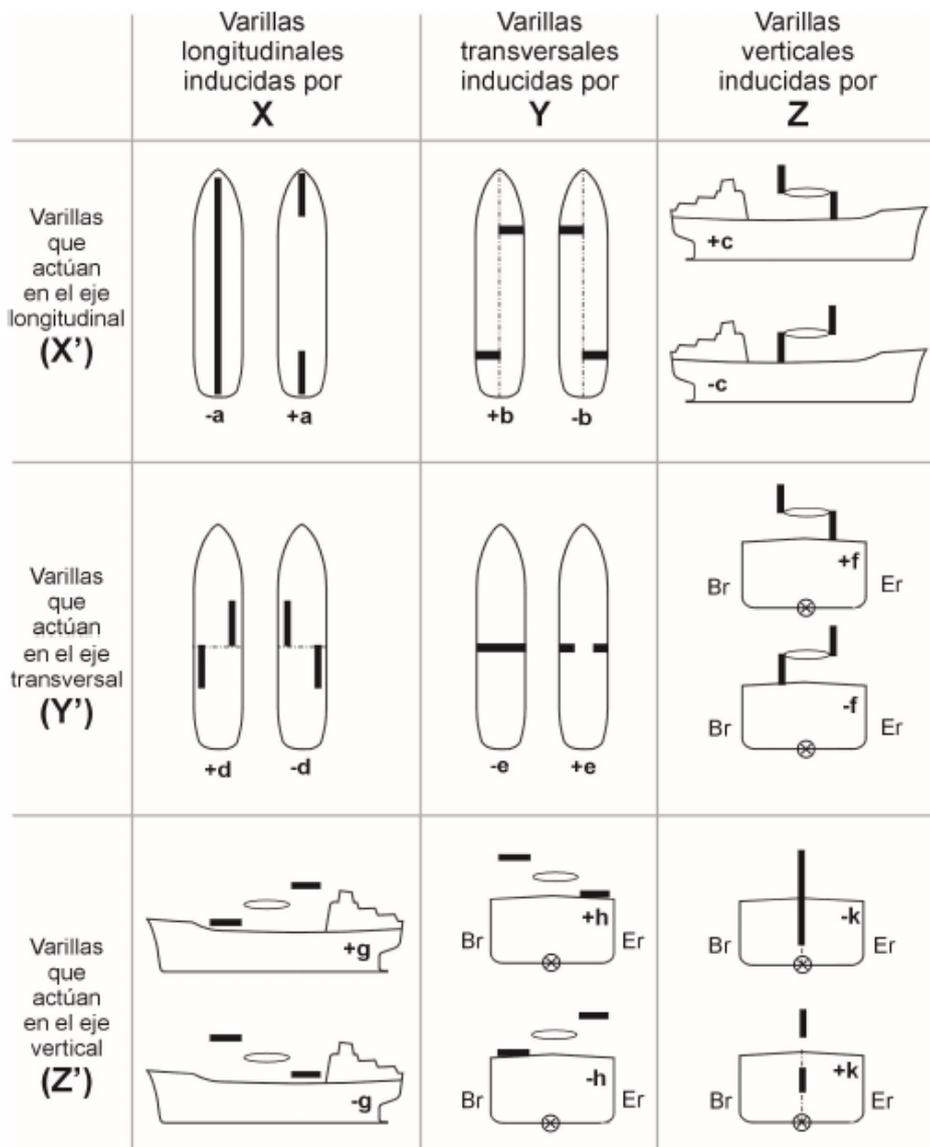


Figura 28. Análisis de las varillas. Fuente: [4]

En la práctica, se cumple que:

- Las varillas a y e suelen ser corridas (negativas), debido a la continuidad de los hieros longitudinales y transversales.
- La varilla k suele ser discontinua (positiva).
- Las varillas b, d, f y h no suelen existir en buques simétricos y con la aguja instalada en crujía, o bien sus valores son muy pequeños.
- La varilla c normalmente es negativa.
- El valor de la varilla g suele ser pequeño.

Capítulo 4. Desarrollo y explicación de las ecuaciones exacta y práctica del desvío

La ecuación práctica del desvío es una ecuación lineal que se obtiene como una simplificación de la ecuación exacta del desvío, la cual no es lineal. Por este motivo, en primer lugar, se hace un estudio de la ecuación exacta, que se desprende directamente de los imanes y de las varillas.¹⁵

4.1 Ecuación exacta del desvío¹⁶

El efecto de los tres campos magnéticos que actúan en la aguja (el terrestre, el permanente del buque y el inducido del buque) crean una resultante que se puede descomponer en un componente hacia el norte magnético y en otro hacia el este magnético (o hacia el oeste). Estos dos componentes se conocen como fuerza al norte (FNt) y fuerza al este (FEt) respectivamente (una desviación hacia el oeste corresponde a una fuerza al este negativa).

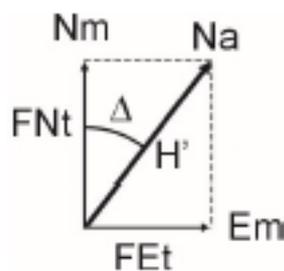


Figura 29. Fuerzas al norte y al este. Fuente: [4]

Los campos magnéticos que dirigen la aguja hacia el norte son:

- El campo magnético terrestre (Cmt).
- El campo magnético permanente (Cmp).
- El campo magnético inducido (Cmi).

¹⁵ Moyano Sanz, S. (2009). *Apuntes de compensación de agujas náuticas*. Facultat de Nàutica de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya

¹⁶ Moyano Sanz, S. (2009). *Apuntes de compensación de agujas náuticas*. Facultat de Nàutica de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya

Por tanto, la fuerza al norte se puede escribir de la siguiente manera:

$$FN = Cmt + Cmp + Cmi$$

$$Cmt: H$$

$$Cmp: P \cos R - Q \sin R$$

$$Cmi: (a + e) \frac{H}{2} + cZ \cos R - fZ \sin R + (a - e) \frac{H \cos 2R}{2} - (b + d) \frac{H \sin 2R}{2}$$

$$FN = H \cdot \left(1 + \frac{a + e}{2}\right) + (P + cZ) \cos R - (Q + fZ) \sin R + (a - e) \frac{H \cos 2R}{2} - (d + b) \frac{H \sin 2R}{2}$$

donde:

Los campos magnéticos que desvían la aguja hacia el este son:

- El campo magnético permanente (Cmp).
- El campo magnético inducido (Cmi).

Por tanto, la fuerza al este se puede escribir de la siguiente manera:

$$FE = Cmp + Cmi$$

donde:

$$Cmp: P \sin R + Q \cos R$$

$$Cmi: (d - b) \frac{H}{2} + cZ \sin R + fZ \cos R + (a - e) \frac{H \sin 2R}{2} + (b + d) \frac{H \cos 2R}{2}$$

$$FE = (d - b) \frac{H}{2} + (P + cZ) \sin R + (Q + fZ) \cos R + (a - e) \frac{H \sin 2R}{2} + (d + b) \frac{H \cos 2R}{2}$$

Asimismo, por ser $Z = H \cdot \tan \theta$

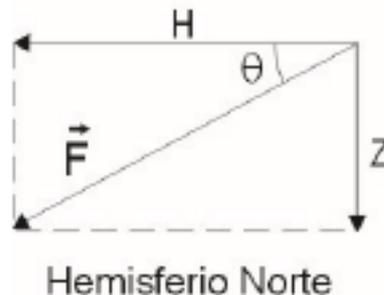


figura 30. Descomposición de F. Fuente: [4]

$$FN = H \cdot \left(1 + \frac{a+e}{2}\right) + (P + cH \tan \theta) \cos R - (Q + fH \tan \theta) \sin R + (a-e) \frac{H \cos 2R}{2} - (d+b) \frac{H \sin 2R}{2}$$

$$FE = (d-b) \frac{H}{2} + (P + cH \tan \theta) \sin R + (Q + fH \tan \theta) \cos R + (a-e) \frac{H \sin 2R}{2} + (d+b) \frac{H \cos 2R}{2}$$

El siguiente paso para hallar la ecuación exacta del desvío es introducir el coeficiente λ y la fuerza directriz media (λH). El coeficiente λ indica la cantidad promedio del campo magnético terrestre horizontal (H). Haciendo la media de las fuerzas al norte a rumbos equidistantes, como por ejemplo los cuatro cardinales o a los ocho principales, se obtiene que:

$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2}$$

De acuerdo con la Figura 29, $FN = H' \cdot \cos \Delta$ y $FE = H' \cdot \sin \Delta$.

Dividiendo las expresiones de FN y FE por la fuerza directriz media, se obtiene:

$$\frac{FN}{\lambda H} = 1 + \left(\frac{P}{\lambda H} + \frac{c}{\lambda} \tan \theta\right) \cos R - \left(\frac{Q}{\lambda H} + \frac{f}{\lambda} \tan \theta\right) \sin R + \frac{a-e}{2\lambda} \cos 2R - \frac{d+b}{2\lambda} \sin 2R$$

$$\frac{FN}{\lambda H} = \frac{H' \cos \Delta}{\lambda H}$$

$$\frac{FE}{\lambda H} = \frac{d-b}{2\lambda} + \left(\frac{P}{\lambda H} + \frac{c}{\lambda} \tan \theta\right) \sin R + \left(\frac{Q}{\lambda H} + \frac{f}{\lambda} \tan \theta\right) \cos R - \frac{a-e}{2\lambda} \sin 2R + \frac{d+b}{2\lambda} \cos 2R$$

$$\frac{FE}{\lambda H} = \frac{H' \sin \Delta}{\lambda H}$$

Puesto que los términos de ambas expresiones son los mismos, se definen los coeficientes $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$, los cuales están relacionados con los imanes y las varillas, y toman el nombre de coeficientes exactos del desvío:

- α depende de las varillas d y b.
- β , del imán P y de la varilla c.
- γ , del imán Q y de la varilla f.
- δ , de las varillas a y e.
- ε , de las varillas d y b, a igual que α .

$$\alpha = \frac{d-b}{2\lambda}$$

$$\beta = \left(\frac{P}{\lambda H} + \frac{c}{\lambda} \tan \theta \right)$$

$$\gamma = \left(\frac{Q}{\lambda H} + \frac{f}{\lambda} \tan \theta \right)$$

$$\delta = \frac{a - e}{2\lambda}$$

$$\varepsilon = \frac{d + b}{2\lambda}$$

Sustituyendo los valores de los coeficientes exactos del desvío en las expresiones de FN y FE, resulta que:

$$\frac{FN}{\lambda H} = \frac{H' \cos \Delta}{\lambda H} = 1 + \beta \cos R - \gamma \sin R + \delta \cos 2R - \varepsilon \sin 2R$$

$$\frac{FE}{\lambda H} = \frac{H' \sin \Delta}{\lambda H} = \alpha + \beta \sin R + \gamma \cos R + \delta \sin 2R + \varepsilon \cos 2R$$

Y dividiendo FE/ λH entre FN/ λH , se obtiene la ecuación exacta del desvío:

$$\tan \Delta = \frac{\alpha + \beta \sin R + \gamma \cos R + \delta \sin 2R + \varepsilon \cos 2R}{1 + \beta \cos R - \gamma \sin R + \delta \cos 2R - \varepsilon \sin 2R}$$

Esta ecuación depende del rumbo magnético, y además, no es lineal. Por tanto, conviene hallar otra ecuación que dependa del rumbo de aguja (que es la indicación de rumbo que se lee en el compás) y que sea lineal.

4.2 Ecuación aproximada o práctica del desvío¹⁷

Desarrollando la ecuación exacta, resulta que:

$$\frac{\sin \Delta}{\cos \Delta} = \frac{\alpha + \beta \sin R + \gamma \cos R + \delta \sin 2R + \varepsilon \cos 2R}{1 + \beta \cos R - \gamma \sin R + \delta \cos 2R - \varepsilon \sin 2R}$$

$$\sin \Delta \cdot (1 + \beta \cos R - \gamma \sin R + \delta \cos 2R - \varepsilon \sin 2R) = \cos \Delta \cdot (\alpha + \beta \sin R + \gamma \cos R + \delta \sin 2R + \varepsilon \cos 2R)$$

Quedando la siguiente expresión:

¹⁷ Moyano Sanz, S. (2009). *Apuntes de compensación de agujas náuticas*. Facultat de Nàutica de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya

$$\sin \Delta = \alpha \cos \Delta + \beta (\sin R \cos \Delta - \cos R \sin \Delta) + \gamma (\cos R \cos \Delta + \sin R \sin \Delta) + \delta (\sin 2R \cos \Delta - \cos 2R \sin \Delta) + \varepsilon (\cos 2R \cos \Delta + \sin 2R \sin \Delta)$$

La cual, de acuerdo con las fórmulas trigonométricas de adición y sustracción, se transforma en:

$$\sin \Delta = \alpha \cos \Delta + \beta \sin(R - \Delta) + \gamma \cos(R - \Delta) + \delta \sin(2R - \Delta) + \varepsilon \cos(2R - \Delta)$$

Interesa que la ecuación esté en función del rumbo de aguja (R') en lugar del magnético (R). Por tanto, se sustituye R por $R' + \Delta$ de manera que:

$$R - \Delta = R' + \Delta - \Delta = R' \quad \text{y} \quad 2R - \Delta = 2(R' + \Delta) - \Delta$$

Luego,

$$\sin \Delta = \alpha \cos \Delta + \beta \sin R' + \gamma \cos R' + \delta \sin(2R' + \Delta) + \varepsilon \cos(2R' + \Delta)$$

Al ser los desvíos ángulos pequeños, se pueden realizar las siguiente cuatro aproximaciones:

- $\sin \Delta \approx \Delta \cdot \sin 1^\circ$
- $\cos \Delta \approx 1$
- $\sin(2R' + \Delta) \approx \sin 2R'$
- $\cos(2R' + \Delta) \approx \cos 2R'$

Con estas aproximaciones, la ecuación exacta se transforma en:

$$\Delta = \frac{\alpha}{\sin 1^\circ} + \frac{\beta}{\sin 1^\circ} \sin R' + \frac{\gamma}{\sin 1^\circ} \cos R' + \frac{\delta}{\sin 1^\circ} \sin 2R' + \frac{\varepsilon}{\sin 1^\circ} \cos 2R'$$

Asimismo, se definen los coeficientes aproximados A, B, C, D, E como $\alpha/\sin 1^\circ, \beta/\sin 1^\circ, \gamma/\sin 1^\circ, \delta/\sin 1^\circ, \varepsilon/\sin 1^\circ$ respectivamente, lo que es equivalente a decir que: mediante la sustitución $\sin x = x \cdot \sin 1^\circ$, los coeficientes exactos son los senos de los aproximados.

Con la introducción de los coeficientes aproximados, se obtiene la fórmula práctica de la ecuación del desvío, también llamada fórmula de Archibaldo, en honor a Archibald Smith (1813 – 1872), quien la desarrolló.

$$\Delta = A + B \sin R' + C \cos R' + D \sin 2R' + E \cos 2R'$$

Capítulo 5. Método para realizar la compensación preliminar y confección de la tablilla de desvíos residuales

5.1 Compensación¹⁸

El objetivo de la compensación es igualar la fuerza orientadora a todos los rumbos. Una correcta compensación garantiza:

- Una buena estabilidad en las indicaciones del rumbo y una correspondencia entre los ángulos de caída del barco y los indicados por la aguja.
- Que, en ningún sector de la rosa, la aguja reaccione con retraso.

Los desvíos son la consecuencia de que la fuerza orientadora no sea igual a todos los rumbos, ya que la variación de dicha fuerza produce aceleraciones angulares en la aguja. Por tanto, anulando los desvíos, se igualan las fuerzas orientadoras y se garantiza el buen funcionamiento de la aguja.

5.1.1 Motivos para la compensación de la aguja¹⁹

Los diferentes hierros que forman un barco, generan desvíos y fuerzas que afectan a la fuerza directriz. También causan desvíos los cambios de latitud magnética (y más aún de hemisferio). La compensación de la aguja es fundamental para anular o reducir al máximo los desvíos, consiguiendo así un campo magnético prácticamente uniforme en cualquier rumbo y posición del buque. Por lo general, las agujas se compensan cada dos años, de acuerdo con la normativa del pabellón del buque. No obstante, otros motivos para realizar una compensación son:

- Observar desvíos anormales.
- Transportar materiales magnéticos.

¹⁸ Moréu Curbera; Martínez Jiménez (1987). *Astronomía y navegación. Tomo III: curso de capitanes*. 3ª ed. Vigo: los autores. Capítulos LXIX–LXXX (pp. 60–206), pp. 329–330. ISBN 8485645014

¹⁹ Gaztelu-Iturri Leicea, R. (1999). *Compensación de la aguja náutica: curso de compensador*. Vitoria: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. ISBN 8445715070

- Estar largos periodos de tiempo con el buque al mismo rumbo (atracado o en dique principalmente)
- Haber recibido descargas eléctricas (impactos de rayos)
- Haber realizado alteraciones de circuitos eléctricos cerca de la aguja
- Haber realizado modificaciones o trabajos importantes en estructuras metálicas del buque.

5.1.2 Correctores usados para la compensación²⁰

Existen dos tipos de correctores: los imanes (horizontales Y verticales) y los hierros dulces (esferas Y barra Flinders).

- Imanes:
 - Imanes Horizontales:

Se colocan en el interior de la bitácora, en unos orificios que hay en ella, los cuales se llaman casillas. Hay casillas longitudinales y transversales, y según se coloquen los imanes en casilla longitudinales o transversales, se habla de imanes longitudinales y transversales. Estos imanes están fabricados de acero con cobalto o tungsteno, y están pintados para distinguir los polos norte y sur (azul o verde el norte, y rojo el sur). Compensan los imanes P y Q creados por los hierros duros del buque, los cuales son la parte principal de los coeficientes B y C respectivamente. Hay que evitar su proximidad a la rosa para no alterar la corrección de los hierros dulces. Los imanes longitudinales suelen ir en pareja, en una casilla doble; mientras que los transversales van en una casilla simple.

- Imanes Verticales:

Estos imanes van colocados en un estuche que recibe el nombre de corrector de escora, el cual se puede acercar o alejar de la rosa. En el estuche, se pueden alojar varios imanes (normalmente hasta siete), aunque también puede haber un único imán de tamaño más grande. Corrigen el desvío de escora; es decir: la oscilación que sufre la aguja cuando el buque da balances.

- Hierros dulces:
 - Esferas:

Las esferas van colocadas en un soporte transversal respecto al compás, y suelen ir pintadas de color verde la de estribor y roja la de babor. Compensan el desvío cuadrantal, que depende principalmente de las varillas a y e, las cuales determinan el coeficiente D. No poseen magnetismo permanente como los imanes, sino que son inducidas por el campo magnético terrestre. Cuando el componente H induce las esferas, estas corrigen el efecto de las varillas a y e.

²⁰ Gaztelu-Iturri Leicea, R. (1999). *Compensación de la aguja náutica: curso de compensador*. Vitoria: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. ISBN 8445715070

- Barra Flinders:

La barra Flinders compensa la parte del desvío semicircular producido por la varilla vertical c. Su posición en la bitácora es a proa del compás, en un estuche vertical, donde la parte superior de la barra está a la altura de la rosa. Está dividida en trozos de hierro dulce, para poder ajustar su longitud según el valor de la varilla c. En el hueco que queda en el interior del estuche cuando la barra no está entera, se colocan tacos de madera o de plástico, llamados suplementos. Estos suplementos se deben colocar en el fondo del estuche, para que el extremo superior de la barra quede a la altura de la rosa. La barra queda inducida por el componente vertical Z del campo magnético terrestre, corrigiendo así el efecto de la varilla vertical c.

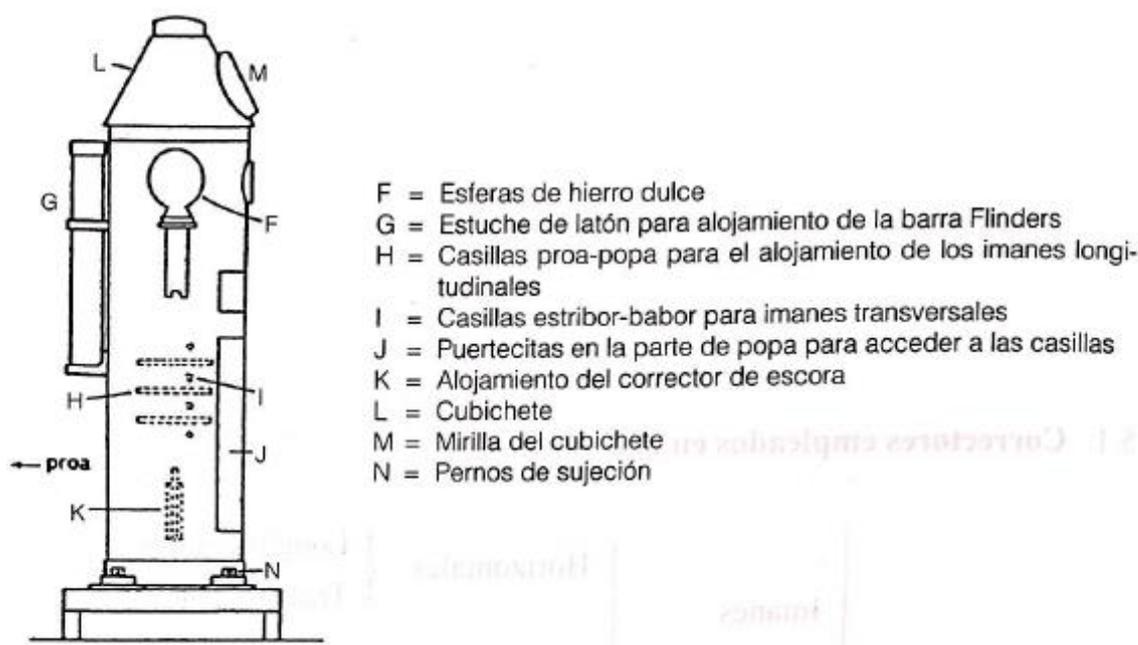


Figura 31. Bitácora. Fuente: [5]

5.2 Desvío de escora²¹

Se llama desvío de escora (Δe) a la diferencia entre los desvíos con el buque adrizado (Δ) y con el buque escorado un ángulo i (Δi), ambos al mismo rumbo: $\Delta e = \Delta i - \Delta$. Cuando el buque escora, los imanes y varillas cambian su posición respecto al campo magnético terrestre y respecto a la rosa, la cual, gracias a su suspensión cardan, se mantiene horizontal. Estos movimientos generan que los desvíos de la aguja tomen nuevos valores. Asimismo, el desvío de escora aumenta a medida que aumenta la escora, y a la vez, cambia de signo según la banda a la que esté escorado el buque. Todo esto se traduce en que: cuando el buque da balances, la aguja oscila, y se hace más difícil gobernar con ella. Este desvío (u

²¹ Moréu Curbera; Martínez Jiménez (1987). *Astronomía y navegación. Tomo III: curso de capitanes*. 3ª ed. Vigo: los autores. Capítulos LXIX–LXXX (pp. 60–206), pp. 329–330. ISBN 8485645014

oscilación) es máximo a los rumbos norte y sur, y nulo al este y al oeste. El elemento que más incide en el desvío de escora es el imán vertical R, y por ello, se compensa con imanes verticales, como se ha explicado en el epígrafe anterior.

5.3 Compensación preliminar²²

La compensación preliminar está enfocada a corregir los principales efectos perturbadores. En la mayoría de casos, suele ser suficiente; pero en buques asimétricos (con diferente distribución de hierros a babor y a estribor), en agujas instaladas fuera de crujía, o en buques que cambia notablemente de latitud magnética, puede ser necesario un ajuste posterior llamado compensación definitiva o exacta. En la compensación preliminar, se caracteriza por:

- La colocación previa y aproximada de la barra Flinders, imán de escora y esferas, teniendo como objetivo reducir los efectos.
- El desvío semicircular se corrige como si fuera ocasionado únicamente por el magnetismo permanente.
- Después de compensar el desvío semicircular, se corrige el desvío cuadrantal con las esferas. Al estar colocadas previamente, su movimiento tiene una afectación mínima a las partes interiores de la compensación.
- Se considerará despreciable el efecto de la varilla f y del coeficiente E .
- La corrección del desvío de escora se condiciona a situaciones posteriores.
- La colocación de los correctores se hace por tanteos.

5.3.1 Procedimiento para compensar

El proceso de compensación se divide en tres etapas:

- Preparativos.
- Práctica de la compensación.
- Obtención de los desvíos residuales.

5.3.1.1 Preparativos

- Colocación aproximada de la barra Flinders:

Se puede realizar de dos formas:

²² Moréu Curbera; Martínez Jiménez (1987). *Astronomía y navegación. Tomo III: curso de capitanes*. 3ª ed. Vigo: los autores. Capítulos LXIX–LXXX (pp. 60–206), pp. 329–330. ISBN 8485645014

1 – Conociendo el rumbo de grada: Aproximaremos a este rumbo o a su opuesto, donde el magnetismo permanente queda anulado, de forma que cualquier desvío que aparezca, es debido a la varilla vertical c , la cual se corrige con la barra Flinders.

2 – Sin conocer el rumbo de grada: Se colocará la mitad de la barra Flinders, y no se hará ninguna acción, esperando a que se pueda determinar el valor del coeficiente B en otra latitud magnética notablemente diferente a la del lugar donde se realiza la compensación preliminar, a fin de calcular la longitud exacta que se necesita de barra Flinders.

No se colocará la barra Flinders en los buques que vayan a realizar navegaciones locales donde el valor del componente vertical Z no cambie apreciablemente.

- Colocación aproximada de las esferas:

Si ya han tenido alguna posición anterior o existe alguna referencia, se posicionarán en ese lugar. De acuerdo con esto, si no se trata de la primera compensación, las esferas se dejarán inicialmente como están. Si se trata de la primera compensación y no se tiene ninguna referencia, se instalarán en la posición en la que están en buques parecidos y con el mismo tipo de bitácora. No obstante, si tampoco se dispone de esta información, se colocarán en la posición media de sus soportes. Asimismo, la siguiente tabla hace referencia a su colocación dependiendo del signo del desvío a los rumbos cuadrantales.

Esferas

	Al través				A cruja			
R_m	NE	SE	SW	NW	NE	SE	SW	NW
Δ	+	-	+	-	-	+	-	+

Tabla 1. Posición de las esferas según el signo de los desvíos cuadrantales.

- Compensación aproximada del desvío de escora:

Como ya se ha indicado, esta compensación es imprescindible cuando el mal tiempo afecta a la estabilidad de la aguja. En algunos casos, la inestabilidad de la aguja llega a ser tan grande que resulta imposible seguir el rumbo.

Se puede realizar de dos formas:

1 – Aprovechando los balances: Este método se puede emplear siempre que los balances sean regulares. Se aproa al norte o al sur, y se busca la disminución de las oscilaciones mediante el imán de escora, que se va subiendo desde su posición más baja hasta lograr que desaparezcan prácticamente la oscilación de la aguja. Si al subir el corrector de escora desde su posición más baja, las oscilaciones aumentaran, esto indicaría que la polaridad es la opuesta y habría que poner los polos del corrector de escora al revés.

2 – Escorando el buque: Se trata de provocar una escora en puerto, la cual no debe ser inferior a 10° . Asimismo, la dirección del muelle debe ser próxima al meridiano magnético. Se realiza la misma operación de subir el corrector de escora desde su posición más baja; pero en lugar de eliminar las

oscilaciones, se hace que la aguja marque el mismo rumbo que con el buque adrizado. En este caso, la polaridad opuesta la indicaría un aumento del desvío al subir el imán.

Aunque formalmente, se considera un preparativo, la compensación del desvío de escora se puede realizar antes o después de la compensación preliminar. En caso de efectuarla con posterioridad, el preparativo sería colocar el corrector a la mitad de su recorrido.

5.3.1.2 Práctica de la compensación

- Procedimiento para compensar:

1 – Se aproa al Em o al Wm, y con parejas de imanes longitudinales, se anula todo el desvío (Na en la línea de fe).

2 – Se aproa al Nm o Sm, y con imanes transversales se anula todo el desvío (Na a la línea de fe).

3 – Se aproa al rumbo magnético opuesto del punto 2, y se busca la reducción del desvío a la mitad, reajustando los imanes longitudinales.

4 – Se aproa al rumbo magnético opuesto del punto 3, y se busca la reducción del desvío a la mitad, reajustando los imanes transversales.

5 – Se aproa al rumbo magnético cuadrantal comprendido entre los rumbos de los puntos 4 y 5, y con las esferas se anula todo el desvío (Na a la línea de fe).

6 – Se aproa a un rumbo magnético distante 90° del del punto 6, y se reduce el desvío a la mitad, reajustando la posición de las esferas.

- Elementos a tener en cuenta a la hora de la práctica de la compensación:

1 – Una vez al rumbo adecuado para realizar la corrección de un desvío, se deben esperar unos 4 minutos antes de actuar sobre los correctores, a fin de que el barco adquiera completamente su estado de inducción a este rumbo.

2 – Los imanes se ponen perpendiculares a la aguja y con el rojo hacia el sentido del desvío.

3 – Si acercando las esferas al máximo, el desvío no se anula, harán falta esferas de mayor diámetro. Se necesitarán de menor diámetro si ocurre lo mismo al alejarlas.

5.3.1.3 Análisis de la compensación

La posición inicial de la barra Flinders, las esferas y el imán de escora minimiza los efectos perturbadores de los imanes y varillas que corrigen.

En cuanto a la compensación, supóngase que se hubiera seguido el siguiente orden:

$$E - N - W - S - SW - NW$$

A cada uno de los rumbos, le corresponde un valor particular de la fuerza desviadora:

$$FE = \lambda H(\alpha + \beta \cdot \sin R + \gamma \cdot \cos R + \delta \cdot \sin 2R + \varepsilon \cdot \cos 2R)$$

1 – Al R = Em, $FE_e = \alpha + \beta - \varepsilon$

Anulando con imanes longitudinales el desvío, se introduce una fuerza β' que corrige no sólo a β , sino también a α y ε :

$$FE_e = (\alpha + \beta - \varepsilon) + \beta' = 0$$

De donde,

$$\beta' = -(\alpha + \beta - \varepsilon) = -\alpha - \beta + \varepsilon = -\beta - (\alpha - \varepsilon)$$

2 – Al R = Nm, $FE_n = \alpha + \gamma + \varepsilon$

De manera análoga al caso anterior, se introduce una fuerza γ' que corrige no sólo a γ , sino también a α y ε :

$$FE_n = (\alpha + \gamma + \varepsilon) + \gamma' = 0$$

De donde,

$$\gamma' = -\gamma - (\alpha + \varepsilon)$$

3 – Al R = Wm, $FE_w = (\alpha - \beta - \varepsilon) - \beta' = \alpha - \beta - \varepsilon + \alpha + \beta - \varepsilon = 2(\alpha - \varepsilon)$

El hecho de reducir el desvío a la mitad con los imanes supone que ha aumentado el valor de β' en $(\alpha - \varepsilon)$. Luego,

$$\beta' = -\beta - (\alpha - \varepsilon) + (\alpha - \varepsilon) = -\beta \quad \gamma \quad FE_e = FE_w = \alpha - \varepsilon$$

4 – Al R = Sm, $FE_s = (\alpha - \gamma + \varepsilon) - \gamma' = \alpha - \gamma + \varepsilon + \gamma + \alpha + \varepsilon = 2(\alpha + \varepsilon)$

De manera análoga al caso anterior,

$$\gamma' = -\gamma - (\alpha + \varepsilon) + (\alpha + \varepsilon) = -\gamma \quad \gamma \quad FE_n = FE_s = \alpha + \varepsilon$$

5 – Al R = SWm, $FE_{sw} = \alpha + \delta$, ya que $\beta = \gamma = 0$

Al anular el desvío con las esferas, se introduce una fuerza δ' que corrige no solo a δ , sino también a α .

$$FE_{sw} = \alpha + \delta + \delta' = 0$$

De donde,

$$\delta' = -\alpha - \delta = -(\alpha + \delta)$$

6 – Al R = NWm, $FE_{nw} = (\alpha - \delta) - \delta' = \alpha - \delta + \alpha + \delta = 2\alpha$

El hecho de reducir el desvío a la mitad con las esferas supone que se ha aumentado el valor de δ' en α . Luego:

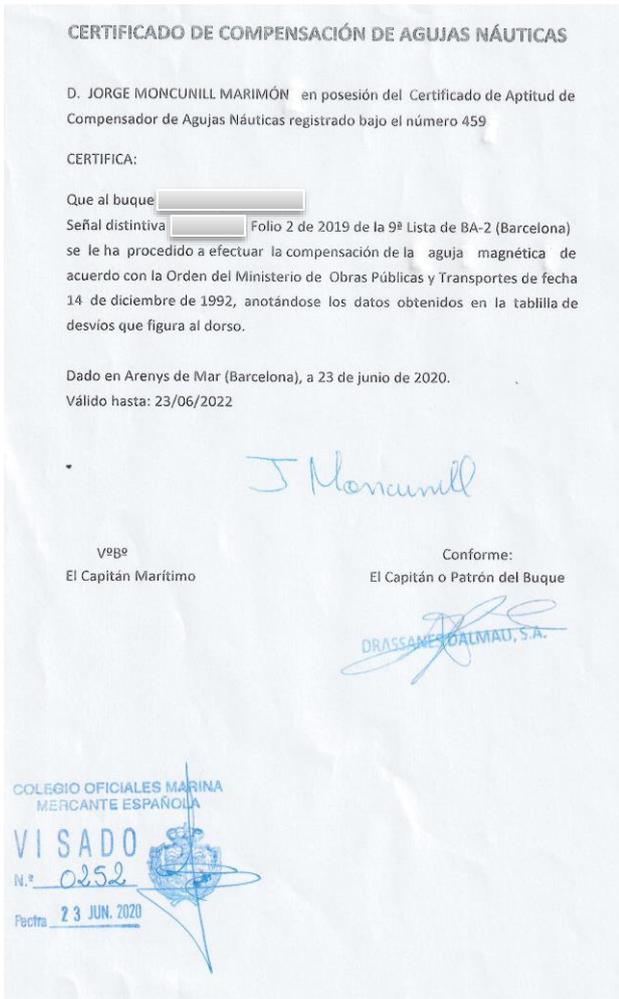
$$\delta' = -(\alpha + \delta) + \alpha = -\delta \quad \gamma \quad FE_{sw} = FE_{nw} = FE_{ne} = FE_{se} = \alpha$$

5.3.2 Tablilla de desvíos residuales²³

De acuerdo con el párrafo 2.1.3 del Capítulo V del Convenio SOLAS, los buques deben disponer, en todo momento, de medios para corregir los rumbos y las demoras a sus valores verdaderos, lo cual, aplicado al compás magnético, supone conocer la declinación magnética, que está en la carta, así como los desvíos. Para ello, juntamente con el certificado de compensación, se confeccionan la tablilla y/o curva de los desvíos residuales, las cuales, según la Resolución A.382(X) de la OMI, estarán siempre visible en la proximidad del compás. Asimismo, de conformidad con el Anexo G de la Norma ISO 25862:2019, los desvíos no deben ser superiores a 3º en buques de eslora igual o superior a 82,5 m, y de 4º en los de eslora inferior a 82,5 m.

Para la confección de la tablilla o curva de los desvíos residuales, se toman los desvíos a los ocho rumbos principales, y mediante un trazado manual, una interpolación o la aplicación de la ecuación del desvío (previo cálculo de los coeficientes), se obtienen los desvíos a otros rumbos. El modelo español de tablilla, contenido en la Orden ministerial de 12 de diciembre sobre compensación de agujas náuticas, considera los rumbos cada 15º a partir del norte.

²³ Moréu Curbera; Martínez Jiménez (1987). *Astronomía y navegación. Tomo III: curso de capitanes*. 3ª ed. Vigo: los autores. Capítulos LXIX–LXXX (pp. 60–206), pp. 329–330. ISBN 8485645014



TABLILLA DE DESVÍOS

Rumbos de aguja	Desvíos	Rumbos de aguja	Desvíos
000 (N)	-0,5	180 (S)	-1,5
015 (N15E)	-0,4	195 (S15W)	-1,6
030 (N30E)	0	210 (S30W)	-1,4
045 (N45E)	0,5	225 (S45W)	-0,9
060 (N60E)	1	240 (S60W)	-0,4
075 (N75E)	1,4	255 (S75W)	0,1
090 (E)	1,5	270 (W)	0,5
105 (S75E)	1,3	285 (N75W)	0,6
120 (S60E)	0,9	300 (N60W)	0,5
135 (S45E)	0,2	315 (N45W)	0,2
150 (S30E)	-0,5	330 (N30W)	-0,1
165 (S15E)	-1,1	345 (N15W)	-0,4

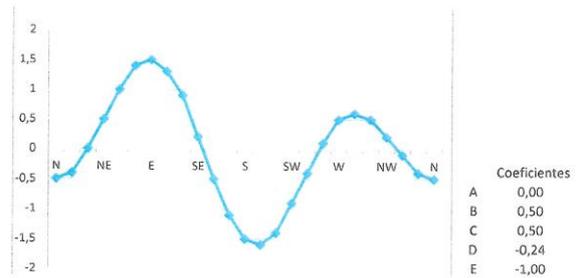


Figura 32. Certificado de compensación. Fuente: propia.

Figura 33. Tablilla y curva de desvíos correspondiente al certificado de la Figura 32. Fuente: propia.

Capítulo 6. Clasificación de los desvíos

6.1 Fuerzas productoras del desvío²⁴

Las fuerzas orientadora y perturbadora totales son:

$$FN = \lambda H(1 + \beta \cdot \cos R - \gamma \cdot \sin R + \delta \cdot \cos 2R - \varepsilon \cdot \sin 2R)$$

$$FE = \lambda H(\alpha + \beta \cdot \sin R + \gamma \cdot \cos R + \delta \sin 2R + \varepsilon \cdot \cos 2R)$$

Considerando λH la unidad de fuerza, sus expresiones se simplifican:

$$FN = 1 + \beta \cdot \cos R - \gamma \cdot \sin R + \delta \cdot \cos 2R - \varepsilon \cdot \sin 2R$$

$$FE = \alpha + \beta \cdot \sin R + \gamma \cdot \cos R + \delta \sin 2R + \varepsilon \cdot \cos 2R$$

En ellas, se aprecian tres partes bien diferenciadas:

Tipo de los términos	Términos de FN	Términos de FE	Valor	Tipo de la fuerza que producen
Independientes de R	1	α	Igual a todos los R	Constante
En función de R	$\beta \cdot \cos R - \gamma \cdot \sin R$	$\beta \cdot \sin R - \gamma \cdot \cos R$	Se repite, con su signo, cada 180°	Semicircular
En función de 2R	$\delta \cdot \cos 2R - \varepsilon \cdot \sin 2R$	$\delta \cdot \sin 2R + \varepsilon \cdot \cos 2R$	Se repite, con su signo, cada 90°	Cuadrantal

Tabla 2. Fuerzas productoras del desvío.

Estas fuerzas producen tres tipos de desvíos: constante, semicircular y cuadrantal.

²⁴ Moréu Curbera; Martínez Jiménez (1987). *Astronomía y navegación. Tomo III: curso de capitanes*. 3ª ed. Vigo: los autores. Capítulos LXIX–LXXX (pp. 60–206), pp. 329–330. ISBN 8485645014

6.1.1 Desvío constante

Las fuerzas que no dependen de R son 1 y α . $\sqrt{1 + \alpha^2}$ es la resultante de ambas fuerzas, que tiene una orientación fija respecto al horizonte y forma un ángulo ω' con la línea del Nm, que está dada por la relación $\tan \omega' = \alpha / 1 = \alpha$. La fuerza productora del desvío constante (FE') es la proyección de la resultante sobre la línea E-W:

$$FE' = \alpha = \sqrt{1 + \alpha^2} \cdot \sin \omega'$$

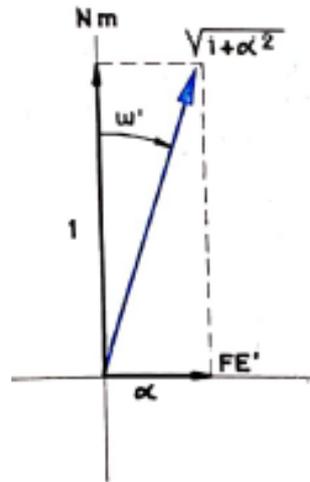


Figura 34. Fuerzas productoras del desvío constante. Fuente: [3]

6.1.2 Desvío semicircular

El coeficiente β está constituido por el imán longitudinal P y la varilla vertical c. La fuerza β actúa sobre la línea proa-popa en uno u otro sentido. Asimismo, la fuerza está formada por el imán Q y la varilla vertical f, y se encuentra sobre la línea del través, y por tanto, a $\pm 90^\circ$ de β . La resultante entre ambas fuerzas es $\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}$, la cual tiene una orientación variable, según el rumbo, respecto al horizonte; pero tiene una orientación fija dentro del buque. El ángulo ω'' que forma con la línea de proa, viene marcado por $\tan 2\omega'' = \gamma/\beta$. La fuerza productora del desvío semicircular (FE''), es la proyección de la resultante sobre la línea E – W, cuyo valor es:

$$FE'' = \beta \cdot \sin R + \gamma \cdot \cos R = \sqrt{\beta^2 + \gamma^2} \cdot \sin(R + \omega'')$$

Dando valores a $(R + \omega'')$, se obtiene:

$R + \omega''$	$\sin(R + \omega'')$	Fuerza desviadora		
		Valor		R que lo verifica
000	0	0	Nulo	$360 - \omega''$
090	+1	$\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}$	Máximo +	$090 - \omega''$
180	0	0	Nulo	$180 - \omega''$
270	-1	$-\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}$	Máximo -	$270 - \omega''$

Tabla 3. Valores máximos y mínimos de la fuerza desviadora del desvío semicircular.

Se observa que los valores del desvío semicircular se repiten cada 180° con el signo cambiado.

6.1.3 Desvío cuadrantal

En los coeficientes δ y ϵ , solo intervienen varillas. Para que los términos $\delta \cdot \cos 2R$ y $\delta \cdot \sin 2R$ queden sobre las líneas N-S y E-W, el coeficiente δ debe estar sobre la que forme un ángulo $2R$ con el meridiano.

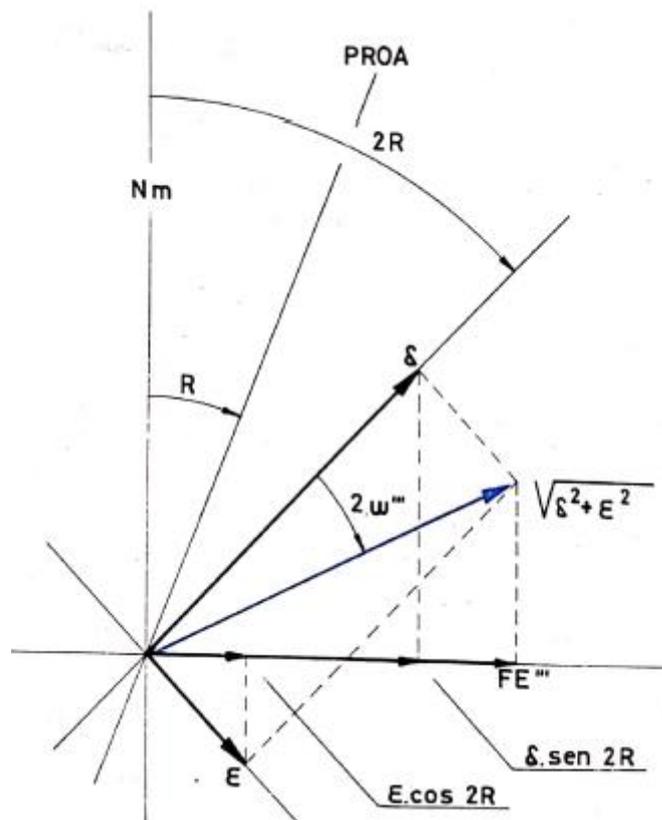


Figura 35. Fuerza productora del desvío cuadrantal. Fuente: [3]

El plano de crujía es la bisectriz del ángulo entre el meridiano magnético y la orientación de δ . Los términos que dependen de ϵ se encuentra sobre una línea a $\pm 90^\circ$ de δ , formando el ángulo $2R$ con la línea E-W. La resultante de las fuerzas que representan los dos coeficientes es $\sqrt{\delta^2 + \epsilon^2}$, la cual forma un ángulo $2\omega'''$ con la línea de $2R$, dado por $\tan 2\omega''' = \epsilon/\delta$. Esta variación de la dirección de δ con el cambio de rumbo, la sufre también la resultante, que será de orientación variable respecto al horizonte y al buque. La fuerza productora del desvío cuadrantal (FE''') es la proyección de la resultante sobre la línea E - W, con su valor:

$$FE''' = \delta \cdot \sin 2R + \epsilon \cdot \cos 2R = \sqrt{\delta^2 + \epsilon^2} \cdot \sin 2(R + \omega''')$$

Dando valores a $(R + \omega')$, se obtiene:

$R + \omega'''$	$2(R + \omega''')$	$\sin 2(R + \omega''')$	Fuerza desviadora		R que lo verifica
			Valor		
000	000	0	0	Nulo	$360 - \omega'''$
045	090	+1	$\sqrt{\delta^2 + \varepsilon^2}$	Máximo +	$045 - \omega'''$
090	180	0	0	Nulo	$090 - \omega'''$
135	270	-1	$-\sqrt{\delta^2 + \varepsilon^2}$	Máximo -	$135 - \omega'''$
180	000	0	0	Nulo	$180 - \omega'''$
225	090	+1	$\sqrt{\delta^2 + \varepsilon^2}$	Máximo +	$225 - \omega'''$
270	180	0	0	Nulo	$270 - \omega'''$
315	270	-1	$-\sqrt{\delta^2 + \varepsilon^2}$	Máximo -	$315 - \omega'''$

Tabla 4. Valores máximos y mínimos de la fuerza desviadora del desvío cuadrantal.

Se observa que los valores del desvío semicircular se repiten cada 90° con el signo cambiado.

6.2 Subdivisiones del desvío²⁵

Hay una correspondencia entre la fuerza desviadora y los términos de la ecuación aproximada del desvío.

	Constante	Semicircular	Cuadrantal
$\frac{FE}{\lambda H} =$	α	$+\beta \sin R + \gamma \cos R$	$+\delta \sin 2R + \varepsilon \cos 2R$
$\Delta =$	A	$+B \sin R' + C \cos R'$	$+D \sin 2R' + E \cos 2R'$
$FE =$	$\sqrt{1 + \alpha^2} \cdot \sin \omega'$	$+\sqrt{\beta^2 + \gamma^2} \cdot \sin(R + \omega')$	$+\sqrt{\delta^2 + \varepsilon^2} \cdot \sin^2(R + \omega''')$

Tabla 5. Desvíos constante, semicircular y cuadrantal.

6.2.1 Desvío constante

Este es debido al coeficiente A, que es independiente del rumbo. Su fuerza productora es el coeficiente exacto α .

²⁵ Moréu Curbera; Martínez Jiménez (1987). *Astronomía y navegación. Tomo III: curso de capitanes*. 3ª ed. Vigo: los autores. Capítulos LXIX–LXXX (pp. 60–206), pp. 329–330. ISBN 8485645014

6.2.2 Desvío semicircular

Debido $B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R'$. Este desvío adquiere valores iguales y de signo contrario cada 180° . La fuerza productora está en función de los coeficientes exactos β y γ , y por tanto, de los aproximados B y C.

Sacando factor común B en esta expresión de este desvío, se tiene:

$$B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' = B \left(\sin R' + \frac{C}{B} \cos R' \right)$$

Y haciendo: $\frac{C}{B} = \tan \omega'' = \frac{\sin \omega''}{\cos \omega''}$

Resulta que:

$$B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' = B \left(\sin R' + \frac{\sin \omega''}{\cos \omega''} \cdot \cos R' \right) =$$

$$B \left(\frac{\sin R' \cdot \cos \omega'' + \cos R' \cdot \sin \omega''}{\cos \omega''} \right) = \frac{B}{\cos \omega''} \cdot \sin(R' + \omega'')$$

Asimismo,

$$\frac{C}{B} = \frac{\sin \omega''}{\cos \omega''}$$

$$\frac{C^2}{B^2} = \frac{\sin^2 \omega''}{\cos^2 \omega''}$$

$$\frac{B^2 + C^2}{B^2} = \frac{\sin^2 \omega'' + \cos^2 \omega''}{\cos^2 \omega''} = \frac{1}{\cos^2 \omega''}$$

Con lo cual,

$$B^2 + C^2 = \frac{B^2}{\cos^2 \omega''} \quad \text{y} \quad \sqrt{B^2 + C^2} = \frac{B}{\cos \omega''}$$

Y por consiguiente,

$$B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' = \sqrt{B^2 + C^2} \cdot \sin(R' + \omega'')$$

Se observa una analogía con la fórmula de la fuerza productora del desvío semicircular. Asimismo, si a esta expresión, se dan valores a $(R' + \omega'')$, se obtiene el cuadro referido a los desvíos:

$R + \omega''$	$\sin(R' + \omega'')$	Desvío		
		Valor		R' que lo verifica
000	0	0	Nulo	360 - ω''
090	+1	$\sqrt{\beta^2 + C^2}$	Máximo +	090 - ω''
180	0	0	Nulo	180 - ω''
270	-1	$-\sqrt{\beta^2 + C^2}$	Máximo -	270 - ω''

Tabla 6. Valores máximos y mínimos del desvío semicircular.

6.2.3 Desvío cuadrantal

Debido a $D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R'$. Este adquiere valores iguales y de signo contrario cada 90° . La fuerza productora es en función de los coeficientes exactos δ y ϵ , y por tanto, de los aproximados D y E .

Realizando un desarrollo análogo al del desvío semicircular, se obtiene:

$$D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' = \sqrt{E^2 + D^2} \cdot \sin 2(R' + \omega''')$$

También se observa una analogía con la fórmula de la fuerza productora del desvío cuadrantal. Y de igual manera que para el desvío semicircular, si a esta expresión, se dan valores a $2(R' + \omega''')$, se obtiene el cuadro referido a los desvíos:

Desvío					
$R + \omega'''$	$2(R + \omega''')$	$\sin 2(R + \omega''')$	Valor		R que lo verifica
000	000	0	0	Nulo	$360 - \omega'''$
045	090	+1	$\sqrt{D^2 + E^2}$	Máximo +	$045 - \omega'''$
090	180	0	0	Nulo	$090 - \omega'''$
135	270	-1	$-\sqrt{D^2 + E^2}$	Máximo -	$135 - \omega'''$
180	000	0	0	Nulo	$180 - \omega'''$
225	090	+1	$\sqrt{D^2 + E^2}$	Máximo +	$225 - \omega'''$
270	180	0	0	Nulo	$270 - \omega'''$
315	270	-1	$-\sqrt{D^2 + E^2}$	Máximo -	$315 - \omega'''$

Tabla 7. Valores máximos y mínimos del desvío cuadrantal.

Capítulo 7. Desarrollo de la ecuación aproximada del desvío y relación con serie de Fourier

7.1 Desarrollo de la ecuación aproximada²⁶

El objetivo de este epígrafe es desarrollar la ecuación exacta del desvío, a fin de obtener una ecuación aproximada con un mayor grado de exactitud que la fórmula práctica. Se parte de la siguiente expresión de la ecuación exacta:

$$\sin \Delta = \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin(2R' + \Delta) + \varepsilon \cdot \cos(2R' + \Delta)$$

Desarrollando, se obtiene:

$$\sin \Delta = \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta(\sin 2R' \cdot \cos \Delta + \cos 2R' \cdot \sin \Delta) + \varepsilon(\cos 2R' \cdot \cos \Delta - \sin 2R' \cdot \sin \Delta)$$

$$\sin \Delta = \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' \cdot \cos \Delta + \delta \cdot \cos 2R' \cdot \sin \Delta + \varepsilon \cdot \cos 2R' \cdot \cos \Delta - \varepsilon \cdot \sin 2R' \cdot \sin \Delta$$

Ahora, se hacen las siguientes aproximaciones:

- $\sin \Delta \approx \Delta$ en radianes.
- $\cos \Delta \approx 1$.
- Despreciar el término $\varepsilon \cdot \sin 2R' \cdot \sin \Delta$. Luego,

$$\Delta \text{ (en radianes)} = \alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \delta \cdot \cos 2R' \cdot \Delta + \varepsilon \cdot \cos 2R'$$
- Δ en el segundo miembro de esta última igualdad se sustituye por el valor de la llamada primera aproximación, la cual consistente en despreciar los coeficientes exactos α y ε :

$$\Delta = \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R'$$

Por consiguiente,

²⁶ Moréu Curbera; Martínez Jiménez (1987). *Astronomía y navegación. Tomo III: curso de capitanes*. 3ª ed. Vigo: los autores. Capítulos LXIX–LXXX (pp. 60–206), pp. 329–330. ISBN 8485645014

$$\Delta \text{ (en radianes)} = \alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \delta \cdot \cos 2R' (\beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \sin 2R') + \varepsilon \cos 2R' = \alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \delta\beta \cdot \cos 2R' \cdot \sin R' + \delta\gamma \cdot \cos 2R' \cdot \cos R' + \delta^2 \cdot \cos 2R' \sin 2R' + \varepsilon \cdot \cos 2R':$$

Y puesto que:

$$\cos 2R' \cdot \sin R' = 1/2(\sin 3R' - \sin R')$$

$$\cos 2R' \cdot \cos R' = 1/2(\cos 3R' + \cos R')$$

$$\cos 2R' \cdot \sin 2R' = 1/2 \sin 4R'$$

Se obtiene:

$$\Delta \text{ (en radianes)} = \alpha + \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \frac{\delta\beta}{2} \sin 3R' - \frac{\delta\beta}{2} \sin R' + \frac{\delta\gamma}{2} \cos 3R' + \frac{\delta\gamma}{2} \cos R' + \frac{\delta^2}{2} \sin 4R' + \varepsilon \cdot \cos 2R' = \alpha + \left(\beta - \frac{\delta\beta}{2}\right) \sin R' + \left(\gamma + \frac{\delta\gamma}{2}\right) \cos R' + \delta \cdot \sin 2R' + \varepsilon \cdot \cos 2R' + \frac{\delta\beta}{2} \sin 3R' + \frac{\delta\gamma}{2} \cos 3R' + \frac{\delta^2}{2} \sin 4R'$$

Esta ecuación recibe el nombre de segunda aproximación de la ecuación del desvío, siendo la primera aproximación, como ya se ha indicado, la siguiente:

$$\Delta = \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R'$$

7.2 Relación con serie de Fourier²⁷

Todas las aproximaciones de la ecuación exacta del desvío (incluida la fórmula práctica) se pueden relacionar con una serie de Fourier. Esto corresponde a la realidad, puesto que los desvíos se repiten cada giro completo del barco, y por tanto, son una función periódica del rumbo de aguja. De acuerdo con la exactitud requerida, se tomarán más o menos términos. Por tanto,

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' + F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' + \dots$$

donde A, B, C,... son los coeficientes aproximados a determinar según la aproximación que se considere. Al igual que los coeficientes de la fórmula práctica, son cantidades en grados.

Para relacionar la segunda aproximación con una serie de Fourier, se debe multiplicar por $180/\pi = 57,3$, para que el desvío se exprese en grados:

$$\Delta = 57,3\alpha + 57,3 \left(\beta - \frac{\delta\beta}{2}\right) \sin R' + 57,3 \left(\gamma + \frac{\delta\gamma}{2}\right) \cos R' + 57,3\delta \sin 2R' + 57,3\varepsilon \cdot \cos 2R' + 57,3 \frac{\delta\beta}{2} \sin 3R' + 57,3 \frac{\delta\gamma}{2} \cos 3R' + 57,3 \frac{\delta^2}{2} \sin 4R'$$

²⁷ Moréu Curbera; Martínez Jiménez (1987). *Astronomía y navegación. Tomo III: curso de capitanes*. 3ª ed. Vigo: los autores. Capítulos LXIX–LXXX (pp. 60–206), pp. 329–330. ISBN 8485645014

Por consiguiente, se obtienen los siguientes coeficientes:

$A = 57,3\alpha$	$\alpha = \frac{A}{57,3} = \sin A$	$\alpha = \sin A$
$B = 57,3\left(\beta - \frac{\delta\beta}{2}\right)$	$\beta - \frac{\delta\beta}{2} = \frac{B}{57,3} = \sin B$	$\beta = \sin B + \frac{\delta\beta}{2}$
$C = 57,3\left(y + \frac{\delta y}{2}\right)$	$y + \frac{\delta y}{2} = \frac{C}{57,3} = \sin C$	$y = \sin C - \frac{\delta y}{2}$
$D = 57,3\delta$	$\delta = \frac{D}{57,3} = \sin D$	$\delta = \sin D$
$E = 57,3\varepsilon$	$\varepsilon = \frac{E}{57,3} = \sin E$	$\varepsilon = \sin E$
$F = 57,3\frac{\delta\beta}{2}$	$\frac{\delta\beta}{2} = \frac{F}{57,3} = \sin F$	$\frac{\delta\beta}{2} = \sin F$
$G = 57,3\frac{\delta y}{2}$	$\frac{\delta y}{2} = \frac{G}{57,3} = \sin G$	$\frac{\delta y}{2} = \sin G$
$H = 57,3\frac{\delta^2}{2}$	$\frac{\delta^2}{2} = \frac{H}{57,3} = \sin H$	$\frac{\delta^2}{2} = \sin H$

Tabla 8. Coeficientes de la segunda aproximación de la ecuación exacta del desvío.

Como se indica en la Tabla 8, para obtener la expresión de los coeficientes F, G y H, es suficiente tomar los valores de β y y correspondientes a la primera aproximación o a la fórmula práctica, con lo cual,

$$F = \frac{1}{2}D \cdot \beta = \frac{1}{2}D \cdot \sin B$$

$$G = \frac{1}{2}D \cdot y = \frac{1}{2}D \cdot \sin C$$

$$H = 57,3\frac{\delta^2}{2} = \frac{1}{2}(57,3 \cdot \delta) = \frac{1}{2}D \cdot \sin D$$

Luego, la segunda aproximación de la ecuación exacta del desvío es:

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' + F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' + H \sin 4R'$$

donde los coeficientes A, D y E son los mismos que los de la fórmula práctica; pero no así los coeficientes B y C. Asimismo, aparecen tres nuevos coeficientes: F, G y H. Estos tres últimos dependen de D, y además, F depende de B y G de C.

Los coeficientes F y G están multiplicados por el seno y el coseno respectivamente del triple del rumbo de aguja. Haciendo un análisis análogo al realizado para los desvíos semicircular y cuadrantal, se observa que los desvíos que dependen del triple del rumbo se repiten cada 60°, que es un sexto del círculo, y por tanto, el conjunto de estos desvíos toma el nombre de desvío sextantal. Por su parte, H es parte del desvío octantal, el que depende del cuádruplo del rumbo de aguja y que se repite cada 45° (octante).

Capítulo 8. Desvíos sextantal y octantal²⁸

Cuando los coeficientes α y ε son grandes, no es aplicable la ecuación del desvío en su forma práctica:

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R'$$

Ni tampoco en su segunda aproximación, la cual se ha desarrollado en el capítulo anterior:

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' + F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' + H \cdot \sin 4R'$$

En estos casos, se debe considerar tanto el desvío sextantal como el octantal completo. Por tanto, se toma la siguiente serie de Fourier:

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' + F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' + H \cdot \sin 4R' + K \cdot \cos 4R'$$

Las expresiones de estos nueve coeficientes (A,...,K) se obtienen de la siguiente manera:

- Por un lado, desarrollando la ecuación exacta del desvío como se hizo en el epígrafe 7.1, pero sin despreciar el término $\varepsilon \cdot \sin 2R' \cdot \sin \Delta$, en el cual también se sustituye el desvío por el valor de la primera aproximación: $\Delta = \beta \cdot \sin R' + \gamma \cdot \cos R' + \delta \cdot \sin 2R'$.
- Por otro lado, particularizando la ecuación para los ocho rumbos principales, de los cuales se conocen los desvíos.

Los resultados son:

$$A = 57,3 \cdot \alpha$$

$$A = \frac{1}{8} \cdot \Sigma \Delta$$

$$B = 57,3 \cdot \beta \cdot \left(1 - \frac{\delta}{2}\right) - \frac{57,3 \cdot \varepsilon \cdot \gamma}{2}$$

$$B = 1 / 4 [(\Delta_e - \Delta_w) + (\Delta_{ne} + \Delta_{se} - \Delta_{sw} - \Delta_{nw}) \cdot 0,707]$$

²⁸ Moréu Curbera; Martínez Jiménez (1987). *Astronomía y navegación. Tomo III: curso de capitanes*. 3ª ed. Vigo: los autores. Capítulos LXIX–LXXX (pp. 60–206), pp. 329–330. ISBN 8485645014

$$C = 57,3 \cdot y \cdot \left(1 + \frac{\delta}{2}\right) - \frac{57,3 \cdot \varepsilon \cdot \beta}{2}$$

$$C = 1 / 4 [(\Delta_n - \Delta_s) + (\Delta_{ne} + \Delta_{nw} - \Delta_{se} - \Delta_{sw}) \cdot 0,707]$$

$$D = 57,3 \cdot \delta$$

$$D = 1 / 4 [(\Delta_{ne} + \Delta_{sw}) - (\Delta_{se} + \Delta_{nw})]$$

$$E = 57,3 \cdot \varepsilon + 57,3 \cdot \alpha \cdot \delta$$

$$E = 1 / 4 [(\Delta_n + \Delta_s) - (\Delta_e + \Delta_w)]$$

$$F = \frac{57,3 \cdot \beta \cdot \delta}{2} - \frac{57,3 \cdot \varepsilon \cdot y}{2}$$

$$F = 1 / 4 [(\Delta_w - \Delta_e) + (\Delta_{ne} + \Delta_{se} - \Delta_{sw} - \Delta_{nw}) \cdot 0,707]$$

$$G = \frac{57,3 \cdot y \cdot \delta}{2} + \frac{57,3 \cdot \varepsilon \cdot \beta}{2}$$

$$G = 1 / 4 [(\Delta_n - \Delta_s) - (\Delta_{ne} + \Delta_{nw} - \Delta_{se} - \Delta_{sw}) \cdot 0,707]$$

$$H = \frac{57,3 \cdot \delta^2}{2}$$

$$K = 57,3 \cdot \delta \cdot \varepsilon$$

$$K = 1 / 8 [(\Delta_n + \Delta_s) + (\Delta_e + \Delta_w) - (\Delta_{se} + \Delta_{sw}) - (\Delta_{se} + \Delta_{nw})]$$

Como ya se indicó, los términos F y G corresponden al desvío sextantal (conjunto de desvíos con valores iguales y de signo contrario cada 60º), mientras que los términos los H y K corresponden al desvío octantal (conjunto de desvíos con valores iguales y de signo contrario cada 45º). Asimismo, 57,3 es el factor de conversión de radianes a grados, y 0,707, el seno y el coseno de 45º. Se observa también como el coeficiente H no se puede expresar en función de los ocho desvíos a los rumbos principales. Esto se debe a que el cuádruplo de los ocho rumbos principales, una vez reducido a un ángulo comprendido entre 0º y 360º, es siempre de 0º o 180º, y por tanto, su seno siempre es nulo. Por consiguiente, al calcular analíticamente la tablilla de los desvíos residuales a partir de los coeficientes A,...,K obtenidos con los desvíos tomados a los ocho rumbos principales, se considerará la siguiente ecuación:

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' + F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' + K \cdot \cos 4R'$$

Luego, se dispone de un sistema de ocho ecuaciones lineales (los casos particulares de los desvíos tomados a los rumbos principales) con ocho incógnitas (los coeficientes A, B, C, D, E, F, G, K), el cual da un resultado único para cada coeficiente.

Capítulo 9. Comparativa de las tablillas de desvíos obtenidas analíticamente según los desvíos y las fórmulas empleadas

9.1 Metodología

Para esta comparativa, se han tomado los desvíos residuales obtenidos a los ocho rumbos principales (los cuatro cardinales y los cuatro cuadrantales) tras la compensación de los siguientes cuatro buques:

- el crucero ALLURE OF THE SEAS
- el car-carrier HÖEGH JACKSONVILLE
- el yate TALITHA.
- el yate MAILYN IV.

Los datos de los dos primeros buques se han obtenido del TFM de N. Ramsden [X]: *Análisis de los desvíos de una aguja náutica mediante el estudio de sus valores cuadrantales*, y los datos de los otros dos buques los ha proporcionado el director de este TFG.

La metodología empleada es muy similar a la del TFM de N. Ramsden. Como aspecto novedoso, en este TFG, se considera la fórmula que tiene en cuenta los desvíos sextantal y octantal. Asimismo, para la realización de los cálculos de los desvíos, así como para la representación de la curva de desvíos, se han usado hojas de cálculo Excel.

Se analizan los datos cada buque de la siguiente forma:

- Caso 1: Se aplica la fórmula práctica del desvío con el D medio: $D = \frac{1}{4} (\Delta_{ne} + \Delta_{sw} - \Delta_{se} - \Delta_{nw})$.
- Caso 2: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NE.
- Caso 3: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SE.
- Caso 4: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SW.
- Caso 5: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NW.
- Caso 6: Se aplica la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal.

9.1.1 Fórmulas empleadas

- Para el caso 1:

Se calculan los coeficientes A, B, C, D y E mediante las siguientes fórmulas:

$$A = \frac{1}{4}(\Delta_n + \Delta_e + \Delta_s + \Delta_w)$$

Para el coeficiente A, se ha considerado solo la media de los desvíos cardinales, puesto que en los casos 2, 3, 4 y 5, es la única manera de obtenerlo. Para los demás,

$$B = \frac{1}{2}(\Delta_e - \Delta_w) \quad C = \frac{1}{2}(\Delta_n - \Delta_s) \quad E = \frac{1}{4}[(\Delta_n + \Delta_s) - (\Delta_e + \Delta_w)]$$

$$D = \frac{1}{4}[(\Delta_{ne} + \Delta_{sw}) - (\Delta_{se} + \Delta_{nw})]$$

Solo en el caso 1 se calcula D con esta fórmula. El resultado se ha denominado D medio.

En la fórmula práctica del desvío, se introducen los valores de los 5 coeficientes, y se particulariza para los rumbos separados 15º a partir del norte. Para cerrar la gráfica, se introduce tanto el 0 como el 360. Además, previamente, se pasan los grados a radianes, que es la unidad que emplean las funciones trigonométricas del Excel. De este modo, se obtiene el valor del desvío residual a cada rumbo:

$$\Delta = A + B \sin R' + C \cos R' + D \sin 2R' + E \cos 2R'$$

- Para los casos 2, 3 4 y 5:

Los coeficientes A, B, C y E tienen el mismo valor. Al disponer solo de un desvío cuadrantal, se obtiene D a partir de este, despejando D de la fórmula práctica del desvío:

$$D = (\Delta_{Cuadrantal} - A - B \cdot \sin R - C \cdot \cos R) \cdot \frac{1}{2 \sin R}$$

Los desvíos a los diferentes rumbos también se calculan con la fórmula práctica:

$$\Delta = A + B \sin R' + C \cos R' + D \sin 2R' + E \cos 2R'$$

- Para el Caso 6:

Se aplica la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal. Para el cálculo de los coeficientes A, B, C, D, E, F, G y K se emplean las siguientes fórmulas:

$$A = 1/8 \sum \Delta$$

En este caso, se debe calcular el coeficiente A con los ocho desvíos.

$$B = 1/4[(\Delta_e - \Delta_w) + (\Delta_{ne} + \Delta_{se} - \Delta_{sw} - \Delta_{nw}) \cdot 0,707]$$

$$C = 1/4[(\Delta_n - \Delta_s) + (\Delta_{ne} + \Delta_{nw} - \Delta_{se} - \Delta_{sw}) \cdot 0,707]$$

$$D = 1 / 4[(\Delta_{ne} + \Delta_{sw}) - (\Delta_{se} + \Delta_{nw})]$$

$$E = 1 / 4[(\Delta_n + \Delta_s) - (\Delta_e + \Delta_w)]$$

$$F = 1 / 4[(\Delta_w - \Delta_e) + (\Delta_{ne} + \Delta_{se} - \Delta_{sw} - \Delta_{nw}) \cdot 0,707]$$

$$G = 1 / 4[(\Delta_n - \Delta_s) - (\Delta_{ne} + \Delta_{nw} - \Delta_{se} - \Delta_{sw}) \cdot 0,707]$$

$$K = 1 / 8[(\Delta_n + \Delta_s) + (\Delta_e + \Delta_w) - (\Delta_{se} + \Delta_{sw}) - (\Delta_{se} + \Delta_{nw})]$$

Y la fórmula empleada para calcular los desvíos a los diferentes rumbos es:

$$\Delta = A + B \cdot \sin R' + C \cdot \cos R' + D \cdot \sin 2R' + E \cdot \cos 2R' + F \cdot \sin 3R' + G \cdot \cos 3R' + K \cdot \cos 4R'$$

9.2 Buque ALLURE OF THE SEAS



Figura 36. Buque Allure of the Seas. Fuente: [13]

Este buque es un crucero de la Royal Caribbean. Fue construido en Meyer Turku, Finlandia.

La siguiente tabla muestra los datos obtenidos durante la toma de los desvíos residuales. Estos datos son los que se precisan para poder realizar el estudio de este trabajo. A estos desvíos, se les llamará desvíos iniciales.

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N
Desvíos	1	-3	-1	1	2	2	0,5	0	1

Tabla 9. Desvíos iniciales (Allure of the Seas).

9.2.1 Caso 1: Se aplica la fórmula práctica del desvío con el D medio

Los coeficientes para este caso son:

A	B	C	D	E
0,625	-0,75	-0,5	-0,5	0,875

Tabla 10. Coeficientes con el D medio (Allure of the Seas).

El coeficiente D es el valor medio: $D = \frac{1}{4}[(\Delta_{ne} + \Delta_{sw}) - (\Delta_{se} + \Delta_{nw})]$

A continuación:

La primera fila son los rumbos cada 15º.

La segunda fila son los rumbos cada 15º en radianes.

La tercera fila es el cálculo del desvío.

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1	0,5	-0,2	-0,8	-1,1	-1,2	-1	-0,5	0,2

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
0,9	1,6	1,9	2	1,8	1,4	1	0,7	0,5

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
0,5	0,7	1	1,3	1,4	1,3	1

Tabla 11. Desvíos residuales con el D medio (Allure of the Seas).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales. En color verde se observan los desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden con ninguno de los desvíos iniciales.

9.2.2 Caso 2: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NE

Los coeficientes para este caso son:

A	B	C	D	E
0,625	-0,75	-0,5	-2,741	0,875

Tabla 12. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Allure of the Seas).

El coeficiente D es el resultado del cálculo con el rumbo en radianes de 45° (NE) y el desvío inicial al NE, que es -3 .

Y los desvíos obtenidos, los siguientes:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1	-0,7	-2,1	-3	-3,1	-2,4	-1	0,6	2,2

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
3,2	3,5	3	2	0,7	-0,5	-1,2	-1,3	-0,6

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
0,5	1,8	3	3,5	3,4	2,5	1

Tabla 13. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Allure of the Seas).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvío cuadrantal (45°) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.2.3 Caso 3: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SE

Los coeficientes para este caso son:

A	B	C	D	E
0,625	-0,75	-0,5	-0,552	0,875

Tabla 14. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Allure of the Seas).

El coeficiente D es el resultado del cálculo con el rumbo en radianes de 135° (SE) y el desvío inicial al SE, que es 1.

Y los desvíos obtenidos, los siguientes:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1	0,4	-0,2	-0,8	-1,2	-1,3	-1	-0,5	0,3

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
1	1,6	1,9	2	1,8	1,4	1	0,6	0,4

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
0,5	0,7	1,1	1,4	1,5	1,4	1

Tabla 15. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Allure of the Seas).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvío cuadrantal (135°) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.2.4 Caso 4: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SW

Los coeficientes para este caso son:

A	B	C	D	E
0,625	-0,75	-0,5	0,4911	0,875

Tabla 16. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Allure of the Seas).

El coeficiente D es el resultado del cálculo con el rumbo en radianes de 225° (SW) y el desvío inicial al SW, que es 2.

Y los desvíos obtenidos, los siguientes:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1	1	0,7	0,2	-0,3	-0,7	-1	-1	-0,6

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
0	0,7	1,4	2	2,3	2,3	2	1,5	1

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
0,5	0,2	0,2	0,3	0,6	0,8	1

Tabla 17. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal al SW (Allure of the Seas).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvío cuadrantal (225°) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.2.5 Caso 5: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NW

Los coeficientes para este caso son:

A	B	C	D	E
0,625	-0,75	-0,5	0,8018	0,875

Tabla 18. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Allure of the Seas).

El coeficiente D es el resultado del cálculo con el rumbo en radianes de 315° (NW) y el desvío inicial al NW que es 0.

Y los desvíos obtenidos, los siguientes:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1	1,1	0,9	0,5	0	-0,6	-1	-1,1	-0,9

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
-0,4	0,4	1,3	2	2,5	2,6	2,3	1,8	1,1

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
0,5	0,1	-0,1	0	0,3	0,7	1

Tabla 19. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Allure of the Seas).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvío cuadrantal (225°) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.2.6 Caso 6: Se aplica la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal

Los coeficientes para este caso son:

A	B	C	D	E	F	G	K
0,3125	-1,082	-1,311	-0,5	0,875	-0,332	0,8105	0,3125

Tabla 20. Coeficientes con los desvíos sextantal y octantal (Allure of the eas).

Hay que calcular los tres coeficientes que no se consideran en la fórmula práctica. Además, los coeficientes A, B y C son diferentes de los obtenidos a partir de la fórmula práctica. Por su parte, los coeficientes D y E coinciden con los de la fórmula práctica.

Y los desvíos obtenidos, los siguientes:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1	-0,2	-1,8	-3	-3,1	-2,3	-1	0,1	0,7

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
1	1,3	1,7	2	2,2	2,2	2	1,7	1,2

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
0,5	-0,1	-0,4	0	0,8	1,3	1

Tabla 21. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Allure of the Seas).

En color azul se observan los desvíos cardinales y cuadrantales, que coinciden con todos los desvíos iniciales.

9.3 Buque HÖEGH JACKSONVILLE



Figura 37. Buque Höegh Jacksonville. Fuente: [13]

Este buque es un car-carrier de la compañía Höegh Autoliners. Fue construido en Corea del Sur, en los astilleros Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering.

En este buque, los desvíos iniciales fueron:

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N
Desvíos	1	0	1	1,5	1	0	1	1	1

Tabla 22. Desvíos iniciales (Höegh Jacksonville).

9.3.1 Caso 1: Se aplica la fórmula práctica del desvío con D medio

Coefficientes:

A	B	C	D	E
1	0	0	-0,625	0

Tabla 23. Coeficientes con el D medio (Höegh Jacksonville).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1	0,7	0,5	0,4	0,5	0,7	1	1,3	1,5

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
1,6	1,5	1,3	1	0,7	0,5	0,4	0,5	0,7

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
1	1,3	1,5	1,6	1,5	1,3	1

Tabla 24. Desvíos residuales con el D medio (Höegh Jacksonville).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales. En color verde se observan los desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden con ninguno de los desvíos iniciales.

9.3.2 Caso 2: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NE

Coefficientes:

A	B	C	D	E
1	0	0	-1	0

Tabla 25. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Höegh Jacksonville).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1	0,5	0,1	0	0,1	0,5	1	1,5	1,9

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
2	1,9	1,5	1	0,5	0,1	0	0,1	0,5

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
1	1,5	1,9	2	1,9	1,5	1

Tabla 26. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Höegh Jacksonville).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvió cuadrantal (45º) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.3.3 Caso 3: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SE

Coeficientes:

A	B	C	D	E
1	0	0	-0,5	0

Tabla 27. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Höegh Jacksonville).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1	0,8	0,6	0,5	0,6	0,8	1	1,3	1,4

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
1,5	1,4	1,3	1	0,8	0,6	0,5	0,6	0,8

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
1	1,3	1,4	1,5	1,4	1,3	1

Tabla 28. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Höegh Jacksonville).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvió cuadrantal (135º) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.3.4 Caso 4: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SW

Coeficientes:

A	B	C	D	E
1	0	0	-1	0

Tabla 29. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Höegh Jacksonville).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1	0,5	0,1	0	0,1	0,5	1	1,5	1,9

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
2	1,9	1,5	1	0,5	0,1	0	0,1	0,5

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
1	1,5	1,9	2	1,9	1,5	1

Tabla 30. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal al SW (Höegh Jacksonville).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvió cuadrantal (225º) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.3.5 Caso 5: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NW

Coeficientes:

A	B	C	D	E
1	0	0	0	0

Tabla 31. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal al NW (Höegh Jacksonville).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1	1	1	1	1	1	1	1	1

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
1	1	1	1	1	1	1	1	1

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
1	1	1	1	1	1	1

Tabla 32. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Höegh Jacksonville).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvió cuadrantal (315º) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.3.6 Caso 6: Se aplica la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal

Coefficientes:

A	B	C	D	E	F	G	K
0,8125	0,0884	-0,088	-0,625	0	0,0884	0,0884	0,1875

Tabla 33. Coeficientes de los desvíos sextantal y octantal (Höegh Jacksonville).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1	0,7	0,2	0	0,1	0,5	1	1,3	1,5

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
1,5	1,5	1,3	1	0,5	0,1	0	0,2	0,7

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
1	1,1	1,1	1	1,1	1,1	1

Tabla 34. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Höegh Jacksonville).

En color azul se observan los desvíos cardinales y cuadrantales, que coinciden con todos los desvíos iniciales.

9.4 Yate TALITHA



Figura 38. Yate Talitha. Fuente: VesselFinder

El Talitha fue construido en los astilleros alemanes de Kiel Friedrich Krupp Germania Werke en 1930. Este barco desplaza 1.103 toneladas. Sus dimensiones son: 80 m de eslora, 10,39 m de manga y 3,91 m de calado. Su casco es de acero, y lo propulsan dos motores diesel Krupp de 1.100 bhp, que le dan una velocidad de 12,8 nudos.

En este yate, los desvíos iniciales fueron:

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N
Desvíos	3	3,5	2	1	0,5	0,5	1,5	0	3

Tabla 35. Desvíos iniciales (Talitha).

9.4.1 Caso 1: Se aplica la fórmula práctica del desvío con D medio

Coefficientes:

A	B	C	D	E
1,75	0,25	1,25	0,75	0

Tabla 36. Coeficientes con el D medio (Talitha).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
3	3,4	3,6	3,6	3,2	2,7	2	1,3	0,7

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
0,3	0,1	0,2	0,5	0,9	1,2	1,4	1,6	1,6

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
1,5	1,5	1,5	1,7	2,1	2,5	3

Tabla 37. Desvíos residuales con el D medio (Talitha).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales. En color verde se observan los desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden con ninguno de los desvíos iniciales.

9.4.2 Caso 2: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NE

Coefficientes:

A	B	C	D	E
1,75	0,25	1,25	0,6893	0

Tabla 38. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Talitha).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
3	3,4	3,6	3,5	3,2	2,7	2	1,3	0,7

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
0,4	0,2	0,3	0,5	0,8	1,1	1,4	1,5	1,5

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
1,5	1,5	1,6	1,8	2,1	2,5	3

Tabla 39. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Talitha).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvío cuadrantal (45º) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.4.3 Caso 3: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SE

Coefficientes:

A	B	C	D	E
1,75	0,25	1,25	0,0429	0

Tabla 40. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Talitha).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
3	3	3	2,9	2,6	2,3	2	1,6	1,3

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
1	0,8	0,6	0,5	0,5	0,6	0,7	0,9	1,2

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	2,9	3

Tabla 41. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Talitha).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvío cuadrantal (135º) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.4.4 Caso 4: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SW

Coefficientes:

A	B	C	D	E
1,75	0,25	1,25	-0,189	0

Tabla 42. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Talitha).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
3	2,9	2,8	2,6	2,4	2,2	2	1,8	1,5

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
1,2	1	0,7	0,5	0,4	0,4	0,5	0,7	1,1

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
1,5	1,9	2,3	2,6	2,9	3	3

Tabla 43. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Talitha).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvío cuadrantal (225º) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.4.5 Caso 5: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NW

Coefficientes:

A	B	C	D	E
1,75	0,25	1,25	2,4571	0

Tabla 44. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Talitha).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
3	4,3	5,1	5,3	4,7	3,5	2	0,4	-0,8

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
-1,4	-1,3	-0,6	0,5	1,7	2,7	3,1	3	2,4

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
1,5	0,6	0	0	0,6	1,7	3

Tabla 45. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Talitha).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvío cuadrantal (315º) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.4.6 Caso 6: Se aplica la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal

Coeficientes:

A	B	C	D	E	F	G	K
1,5	0,832	0,9785	0,75	0	0,582	0,2715	0,25

Tabla 46. Coeficientes con los desvíos sextantal y octantal (Talitha).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
3	3,8	3,9	3,5	3	2,5	2	1,6	1,2

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
1	0,9	0,7	0,5	0,2	0,2	0,5	1,1	1,5

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
1,5	0,9	0,2	0	0,6	1,8	3

Tabla 47. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Talitha).

En color azul se observan los desvíos cardinales y cuadrantales, que coinciden con todos los desvíos iniciales.

9.5 Yate MAILYN IV



Figura 39. Yate Mailyn IV. Fuente: VesselFinder

El MYLIN IV es un yate de lujo de 61 m de eslora (200'02") construido en el astillero Feadship en 1992. El diseño naval y el exterior fueron obra de De Voogt Naval Architects, mientras que sus interiores fueron diseñados por Donald Starkey Designs.

En este yate, los desvíos fueron:

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N
Desvíos	1,5	1,5	2,5	-2,5	-3,5	-1,5	-1,5	-2,5	1,5

Tabla 48. Desvíos iniciales (Mailyn IV).

9.5.1 Caso 1: Se aplica la fórmula práctica del desvío con D medio

Coefficientes:

A	B	C	D	E
-0,25	2	2,5	1,25	-0,75

Tabla 49. Coeficientes con el D medio (Mailyn IV).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1,5	2,7	3,6	4,2	4,2	3,6	2,5	1,1	-0,5

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
-1,9	-2,9	-3,4	-3,5	-3,2	-2,7	-2,2	-1,8	-1,6

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
-1,5	-1,5	-1,4	-1,1	-0,5	0,4	1,5

Tabla 50. Desvíos residuales con el D medio (Mailyn IV).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales. En color verde se observan los desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden con ninguno de los desvíos iniciales.

9.5.2 Caso 2: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NE

Coefficientes:

A	B	C	D	E
-0,25	2	2,5	-1,43	-0,75

Tabla 51. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Mailyn IV).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1,5	1,3	1,3	1,5	1,9	2,3	2,5	2,4	1,8

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
0,8	-0,5	-2,1	-3,5	-4,5	-5	-4,9	-4,1	-2,9

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
-1,5	-0,2	0,9	1,5	1,8	1,7	1,5

Tabla 52. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Mailyn IV).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvío cuadrantal (45º) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.5.3 Caso 3: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SE

Coefficientes:

A	B	C	D	E
-0,25	2	2,5	1,896	-0,75

Tabla 53. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Mailyn IV).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1,5	3	4,2	4,8	4,7	3,9	2,5	0,7	-1

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
-2,5	-3,4	-3,7	-3,5	-2,9	-2,1	-1,5	-1,2	-1,2

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
-1,5	-1,8	-2	-1,8	-1,1	0	1,5

Tabla 54. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Mailyn IV).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvío cuadrantal (135º) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.5.4 Caso 4: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SW

Coefficientes:

A	B	C	D	E
-0,25	2	2,5	1,932	-0,75

Tabla 55. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Mailyn IV).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1,5	3	4,2	4,9	4,8	3,9	2,5	0,7	-1,1

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
-2,5	-3,5	-3,8	-3,5	-2,9	-2,1	-1,5	-1,2	-1,2

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
-1,5	-1,9	-2	-1,8	-1,1	0	1,5

Tabla 56. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Mailyn IV).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvío cuadrantal (225º) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.5.5 Caso 5: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NW

Coefficientes:

A	B	C	D	E
-0,25	2	2,5	2,604	-0,75

Tabla 57. Coeficientes con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Maily IV).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1,5	3,3	4,8	5,5	5,4	4,3	2,5	0,4	-1,6

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
-3,2	-4	-4,1	-3,5	-2,5	-1,5	-0,8	-0,6	-0,9

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
-1,5	-2,2	-2,6	-2,5	-1,7	-0,3	1,5

Tabla 58. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Maily IV).

En color azul se observan los desvíos cardinales, que una vez calculados coinciden con los desvíos iniciales, y el desvió cuadrantal (315º) con el que se ha calculado el coeficiente D. En color verde se observan los otros tres desvíos cuadrantales, que una vez calculados, no coinciden los desvíos iniciales.

9.5.6 Caso 6: Se aplica la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal

Coeficientes:

A	B	C	D	E	F	G	K
-0,75	1,53	1,78	1,25	-0,75	-0,47	0,72	0,5

Tabla 59. Coeficientes con los desvíos sextantal y octantal (Maily IV).

Desvíos:

0	15	30	45	60	75	90	105	120
0	0,2618	0,5236	0,7854	1,0472	1,309	1,5708	1,8326	2,0944
1,5	1,8	1,5	1,5	2	2,5	2,5	1,4	-0,6

135	150	165	180	195	210	225	240	255
2,3562	2,618	2,8798	3,1416	3,4034	3,6652	3,927	4,1888	4,4506
-2,5	-3,7	-3,9	-3,5	-2,8	-2,1	-1,5	-1	-1

270	285	300	315	330	345	360
4,7124	4,9742	5,236	5,4978	5,7596	6,0214	6,2832
-1,5	-2,3	-2,9	-2,5	-1,2	0,4	1,5

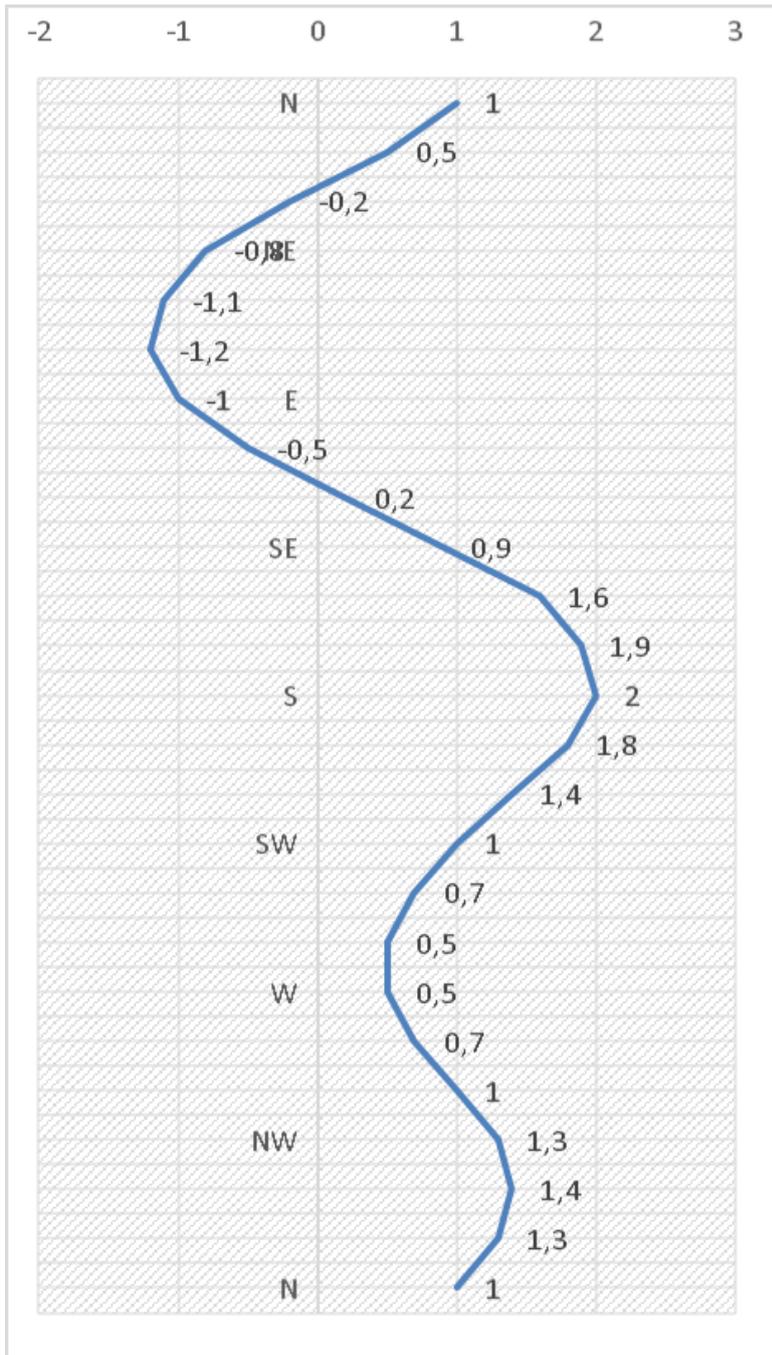
Tabla 60. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Maily IV).

En color azul se observan los desvíos cardinales y cuadrantales, que coinciden con todos los desvíos iniciales.

9.6 Gráficas

9.6.1 Gráficas del buque ALLURE OF THE SEAS

Caso 1: Se aplica la fórmula práctica del desvío con D medio.

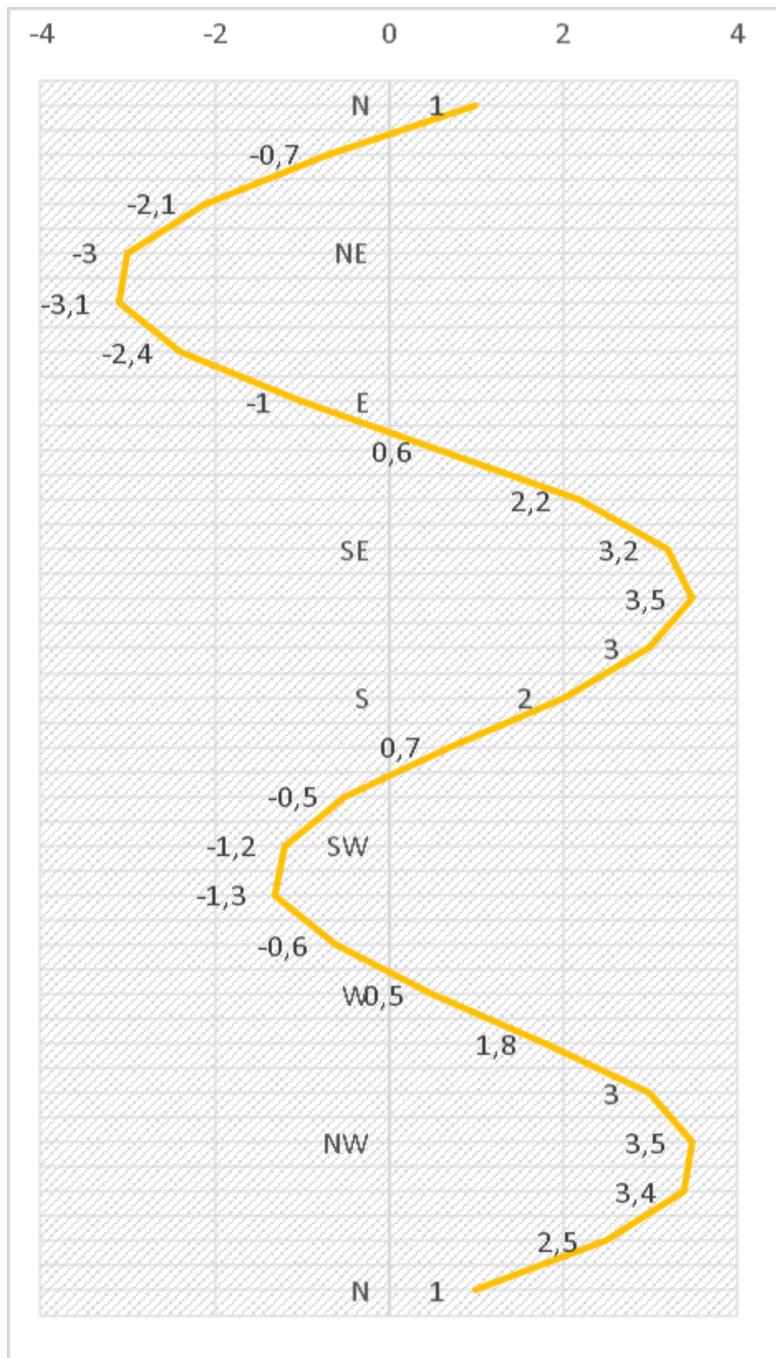


000 - N	1
015	0,5
030	-0,2
045 - NE	-0,8
060	-1,1
075	-1,2
090 - E	-1
105	-0,5
120	0,2
135 - SE	0,9
150	1,6
165	1,9
180 - S	2
195	1,8
210	1,4
225 - SW	1
240	0,7
255	0,5
270 - W	0,5
285	0,7
300	1
315 - NW	1,3
330	1,4
345	1,3
360 - N	1

Figura 40. Curva de los desvíos residuales con el D medio (Allure of the Seas).

Tabla 61. Desvíos residuales con el D medio (Allure of the Seas).

Caso 2: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NE.

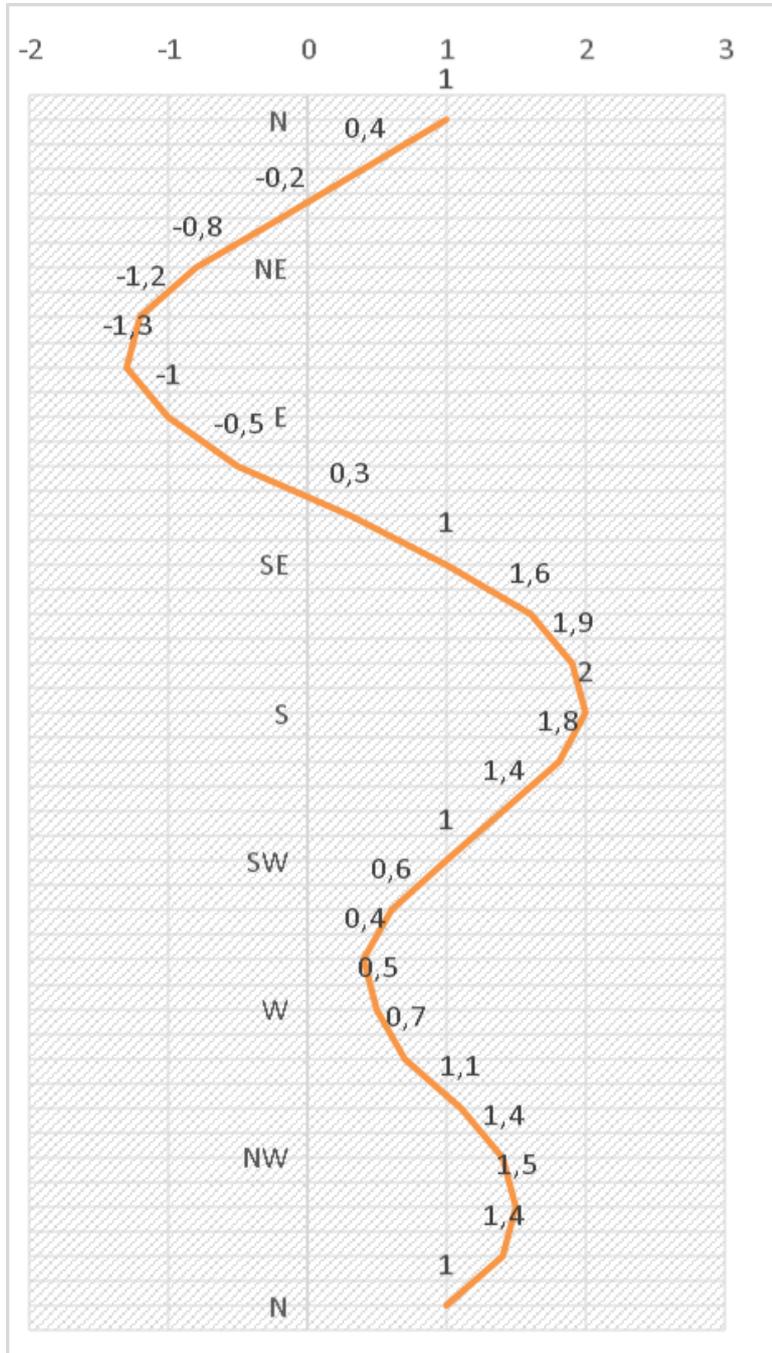


000 - N	1
015	-0,7
030	-2,1
045 - NE	-3
060	-3,1
075	-2,4
090 - E	-1
105	0,6
120	2,2
135 - SE	3,2
150	3,5
165	3
180 - S	2
195	0,7
210	-0,5
225 - SW	-1,2
240	-1,3
255	-0,6
270 - W	0,5
285	1,8
300	3
315 - NW	3,5
330	3,4
345	2,5
360 - N	1

Figura 41. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Allure of the Seas).

Tabla 62. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Allure of the Seas).

Caso 3: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbo: 4 cardinales y el cuadrantal SE.

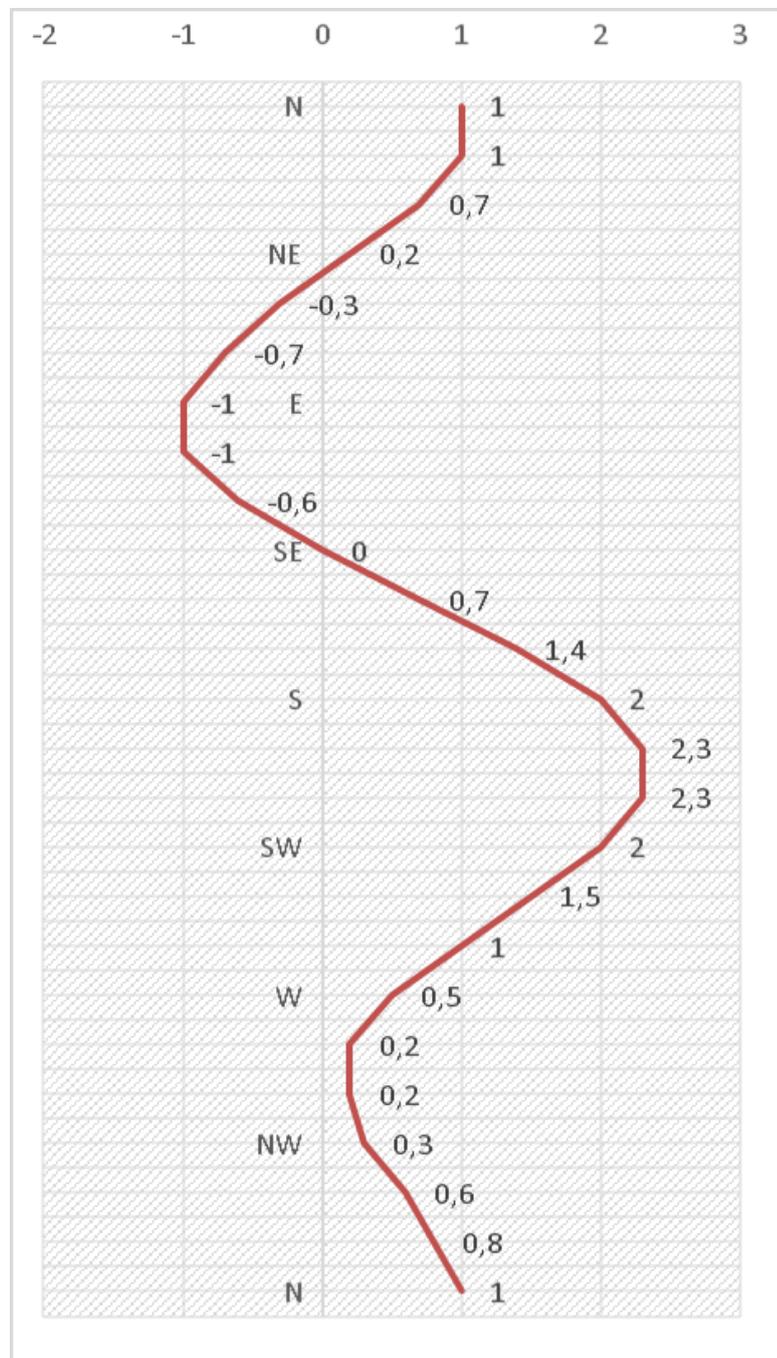


000 - N	1
015	0,4
030	-0,2
045 - NE	-0,8
060	-1,2
075	-1,3
090 - E	-1
105	-0,5
120	0,3
135 - SE	1
150	1,6
165	1,9
180 - S	2
195	1,8
210	1,4
225 - SW	1
240	0,6
255	0,4
270 - W	0,5
285	0,7
300	1,1
315 - NW	1,4
330	1,5
345	1,4
360 - N	1

Figura 42. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Allure of the Seas).

Tabla 63. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal al SE (Allure of the Seas).

Caso 4: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SW.

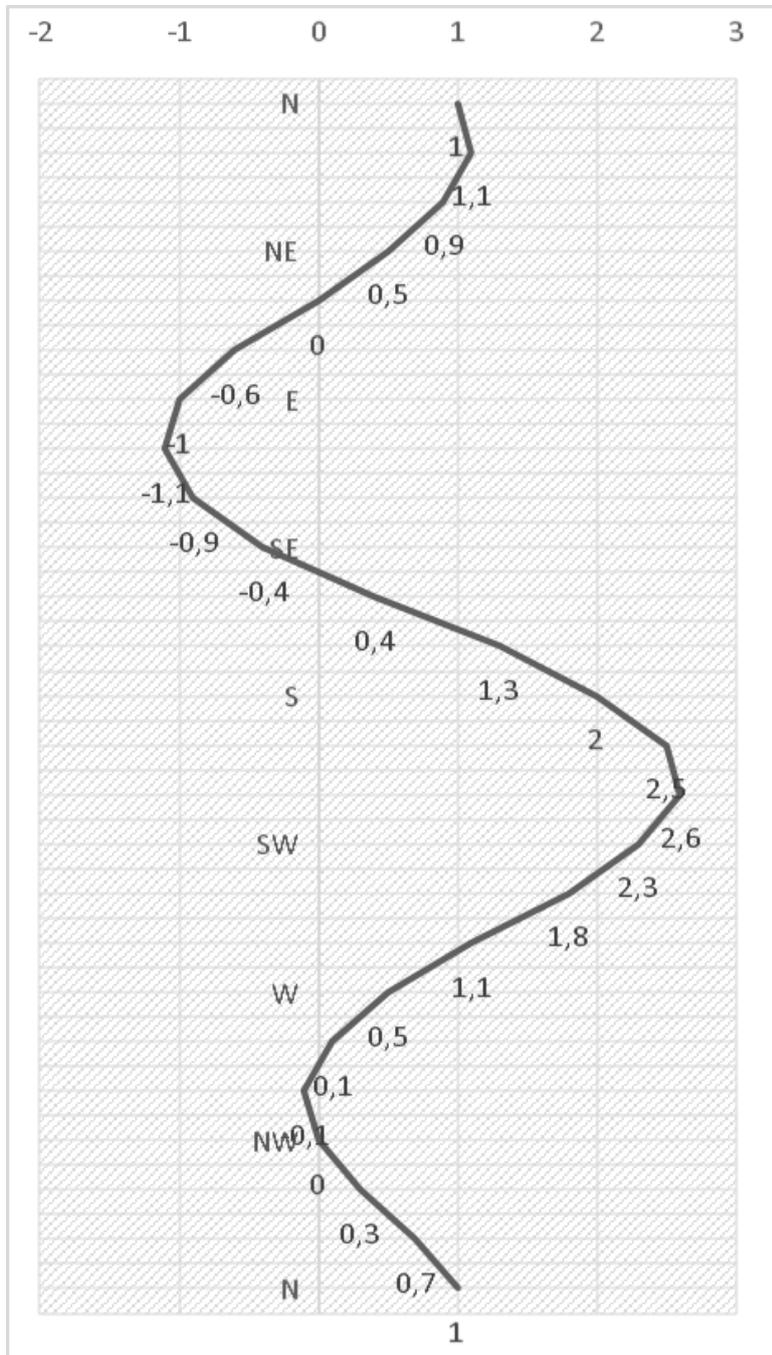


000 - N	1
015	1
030	0,7
045 - NE	0,2
060	-0,3
075	-0,7
090 - E	-1
105	-1
120	-0,6
135 - SE	0
150	0,7
165	1,4
180 - S	2
195	2,3
210	2,3
225 - SW	2
240	1,5
255	1
270 - W	0,5
285	0,2
300	0,2
315 - NW	0,3
330	0,6
345	0,8
360 - N	1

Figura 43. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Allure of the Seas).

Tabla 64. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Allure of the Seas).

Caso 5: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NW.

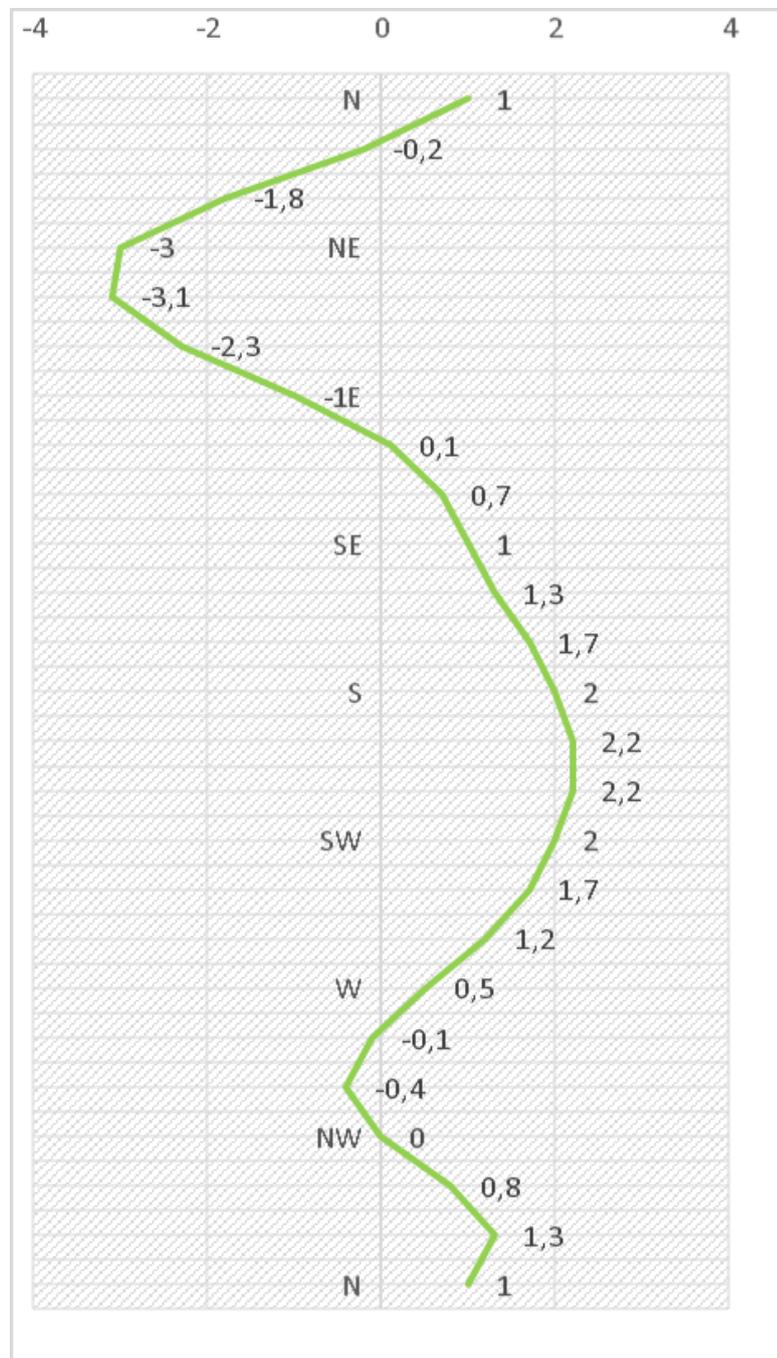


000 - N	1
015	1,1
030	0,9
045 - NE	0,5
060	0
075	-0,6
090 - E	-1
105	-1,1
120	-0,9
135 - SE	-0,4
150	0,4
165	1,3
180 - S	2
195	2,5
210	2,6
225 - SW	2,3
240	1,8
255	1,1
270 - W	0,5
285	0,1
300	0
315 - NW	0,1
330	0,3
345	0,7
360 - N	1

Figura 44. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Allure of the Seas).

Tabla 65. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Allure of the Seas).

Caso 6: Se aplica la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal.



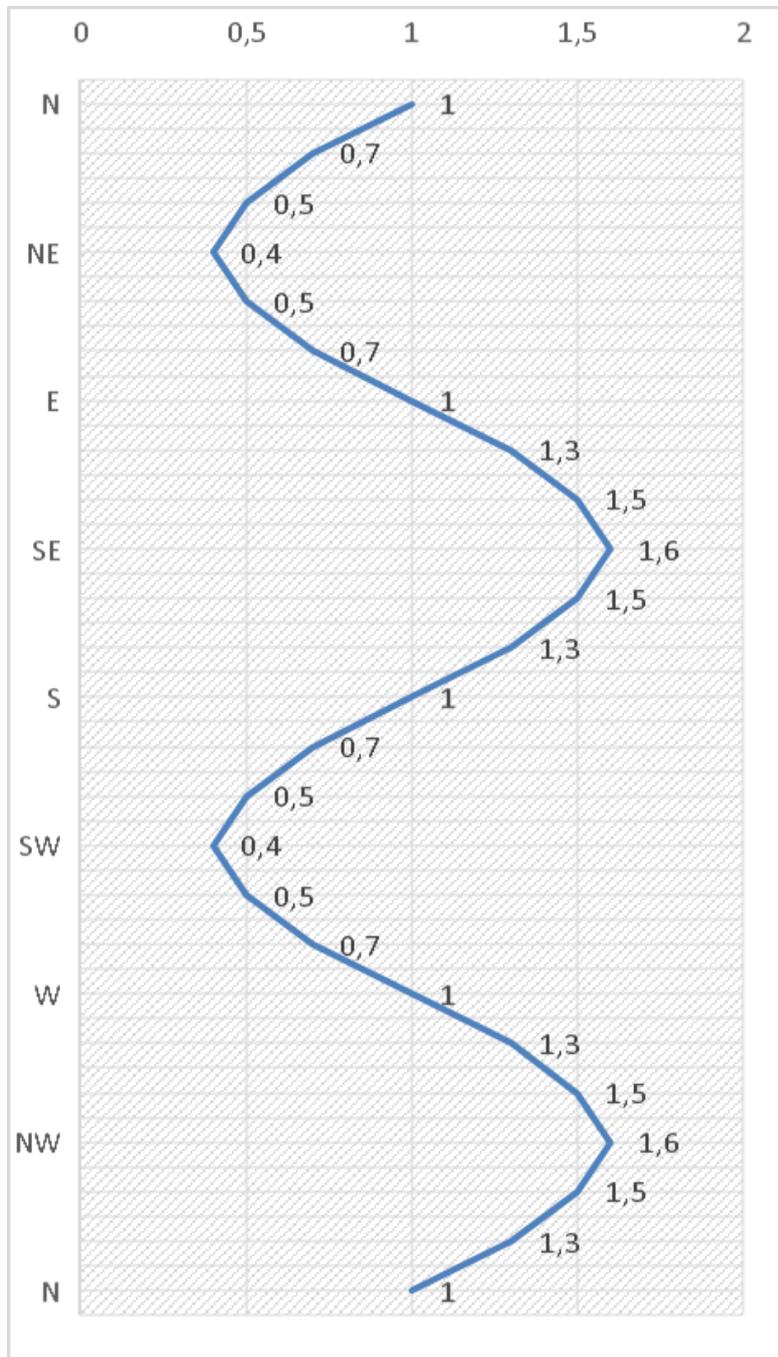
000 - N	1
015	-0,2
030	-1,8
045 - NE	-3
060	-3,1
075	-2,3
090 - E	-1
105	0,1
120	0,7
135 - SE	1
150	1,3
165	1,7
180 - S	2
195	2,2
210	2,2
225 - SW	2
240	1,7
255	1,2
270 - W	0,5
285	-0,1
300	-0,4
315 - NW	0
330	0,8
345	1,3
360 - N	1

Figura 45. Curva de los desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Allure of the Seas).

Tabla 66. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Allure of the Seas).

9.6.2 Gráficas del buque HÖEGH JACKSONVILLE

Caso 1: Se aplica la fórmula práctica del desvío con D medio.

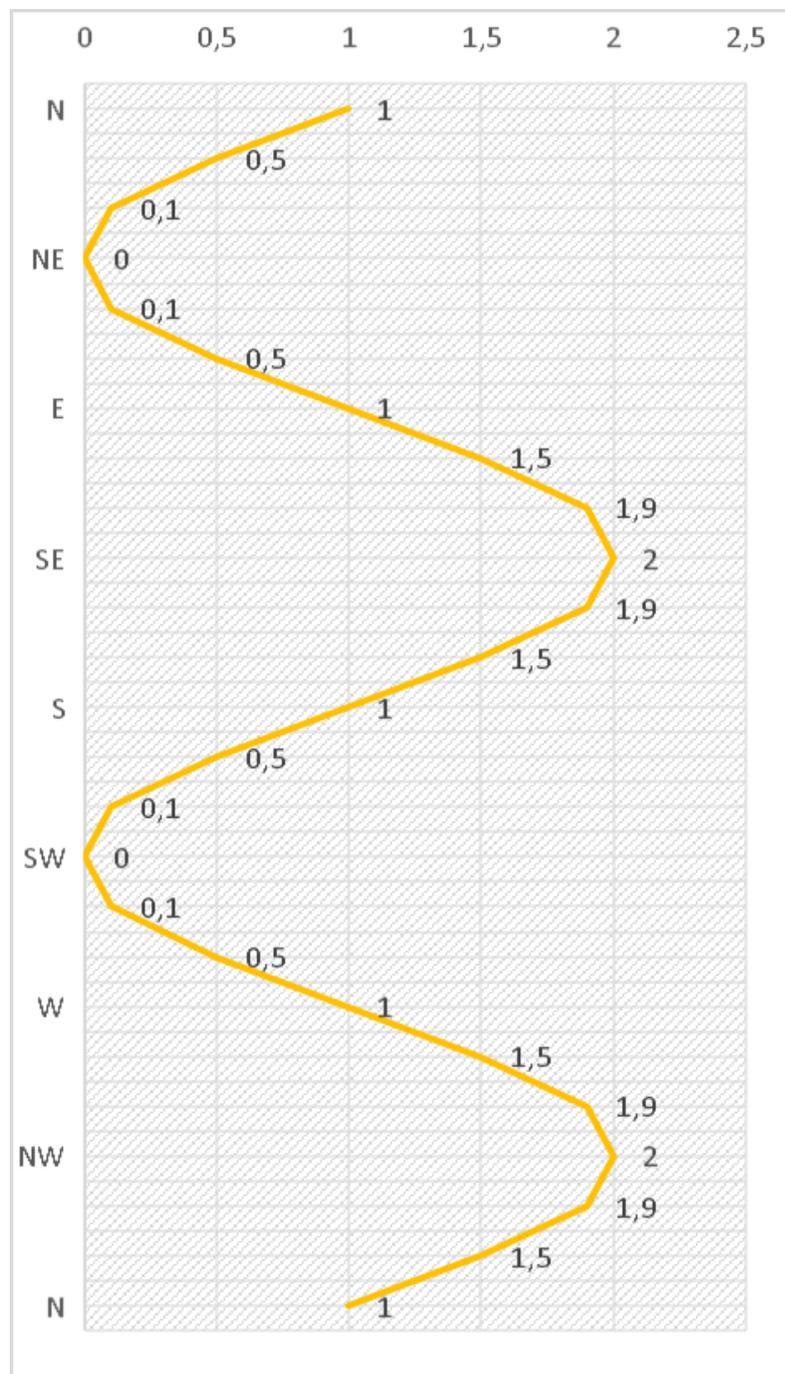


000 - N	1
015	0,7
030	0,5
045 - NE	0,4
060	0,5
075	0,7
090 - E	1
105	1,3
120	1,5
135 - SE	1,6
150	1,5
165	1,3
180 - S	1
195	0,7
210	0,5
225 - SW	0,4
240	0,5
255	0,7
270 - W	1
285	1,3
300	1,5
315 - NW	1,6
330	1,5
345	1,3
360 - N	1

Figura 46. Curva de los desvíos residuales con el D medio (Höegh Jacksonville).

Tabla 67. Desvíos residuales con el D medio (Höegh Jacksonville).

Caso 2: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NE.

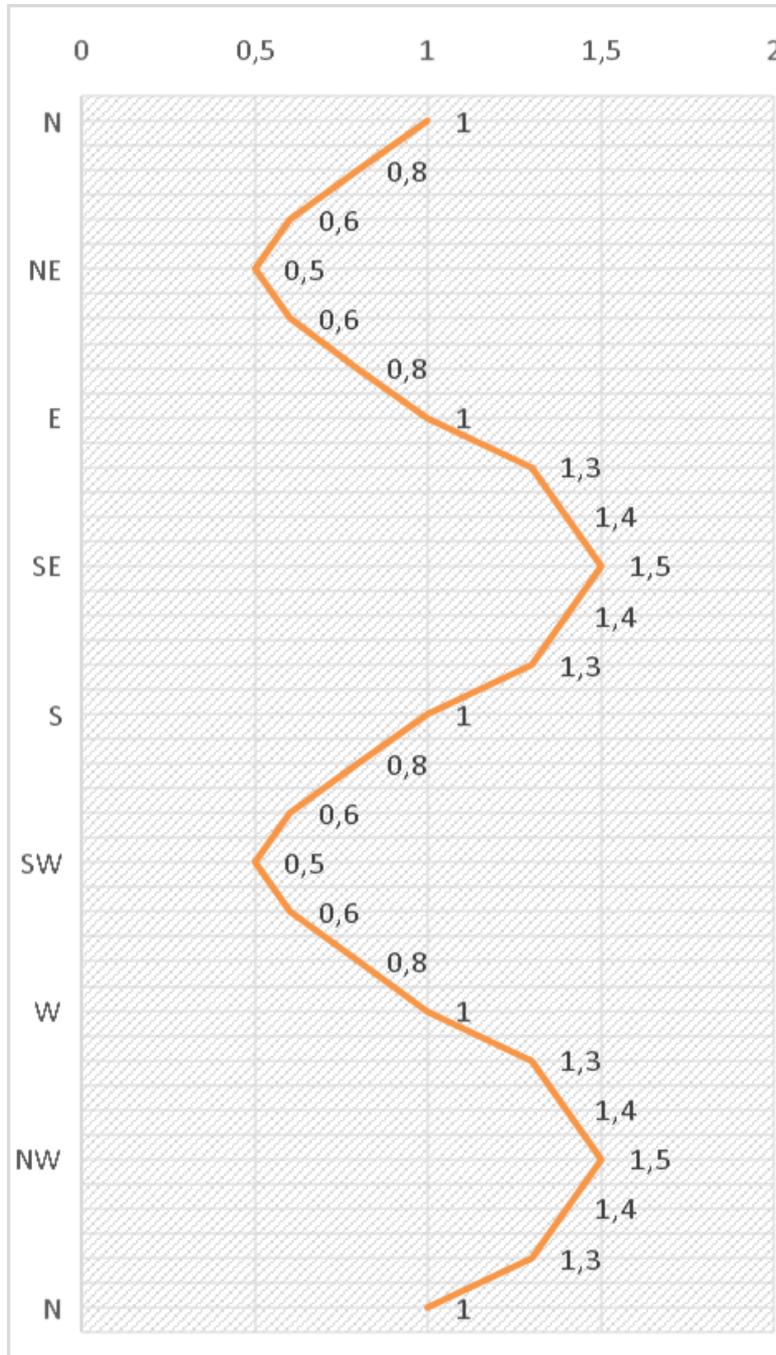


000 - N	1
015	0,5
030	0,1
045 - NE	0
060	0,1
075	0,5
090 - E	1
105	1,5
120	1,9
135 - SE	2
150	1,9
165	1,5
180 - S	1
195	0,5
210	0,1
225 - SW	0
240	0,1
255	0,5
270 - W	1
285	1,5
300	1,9
315 - NW	2
330	1,9
345	1,5
360 - N	1

Figura 47. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Höegh Jacksonville).

Tabla 68. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Höegh Jacksonville).

Caso 3: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SE.

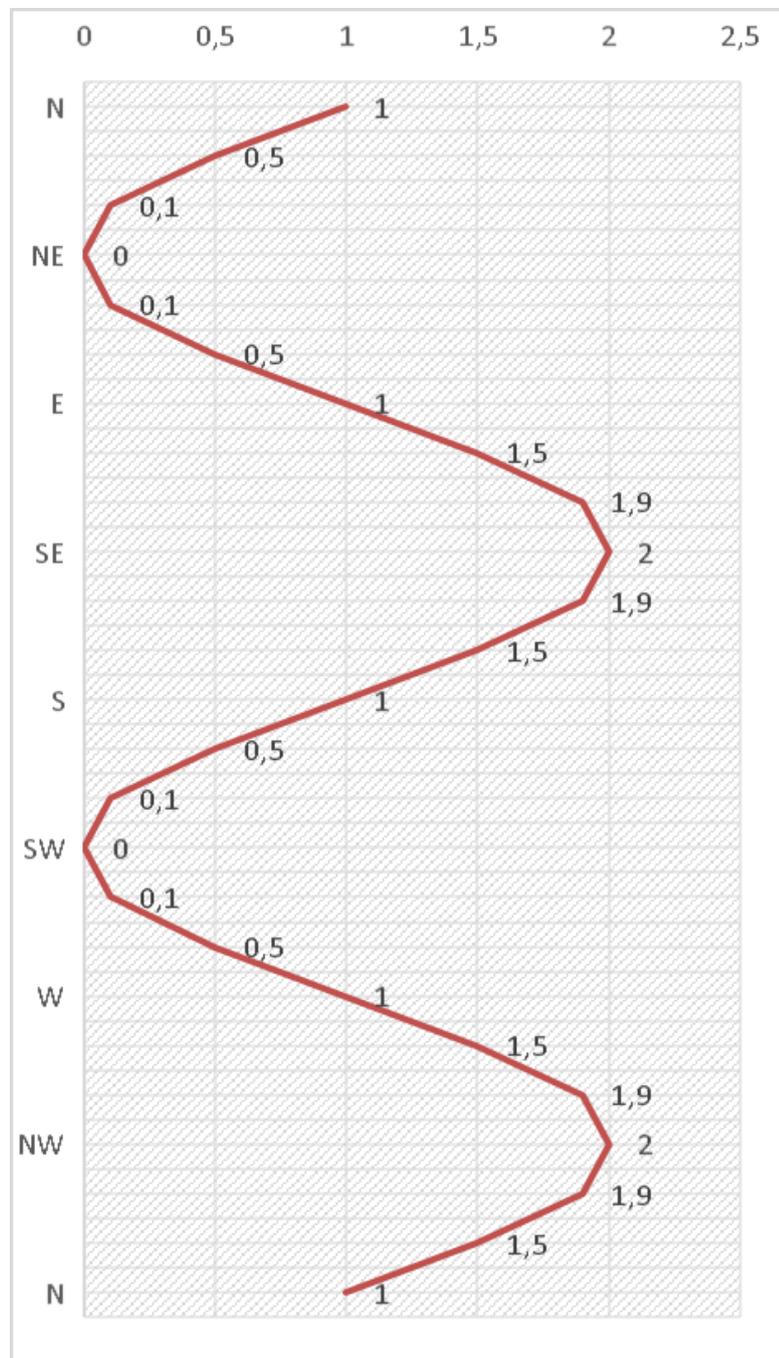


000 - N	1
015	0,8
030	0,6
045 - NE	0,5
060	0,6
075	0,8
090 - E	1
105	1,3
120	1,4
135 - SE	1,5
150	1,4
165	1,3
180 - S	1
195	0,8
210	0,6
225 - SW	0,5
240	0,6
255	0,8
270 - W	1
285	1,3
300	1,4
315 - NW	1,5
330	1,4
345	1,3
360 - N	1

Figura 48. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Höegh Jacksonville).

Tabla 69. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Höegh Jacksonville).

Caso 4: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SW.



000 - N	1
015	0,5
030	0,1
045 - NE	0
060	0,1
075	0,5
090 - E	1
105	1,5
120	1,9
135 - SE	2
150	1,9
165	1,5
180 - S	1
195	0,5
210	0,1
225 - SW	0
240	0,1
255	0,5
270 - W	1
285	1,5
300	1,9
315 - NW	2
330	1,9
345	1,5
360 - N	1

Figura 49. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Höegh Jacksonville).

Tabla 70. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Höegh Jacksonville).

Caso 5: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NW.

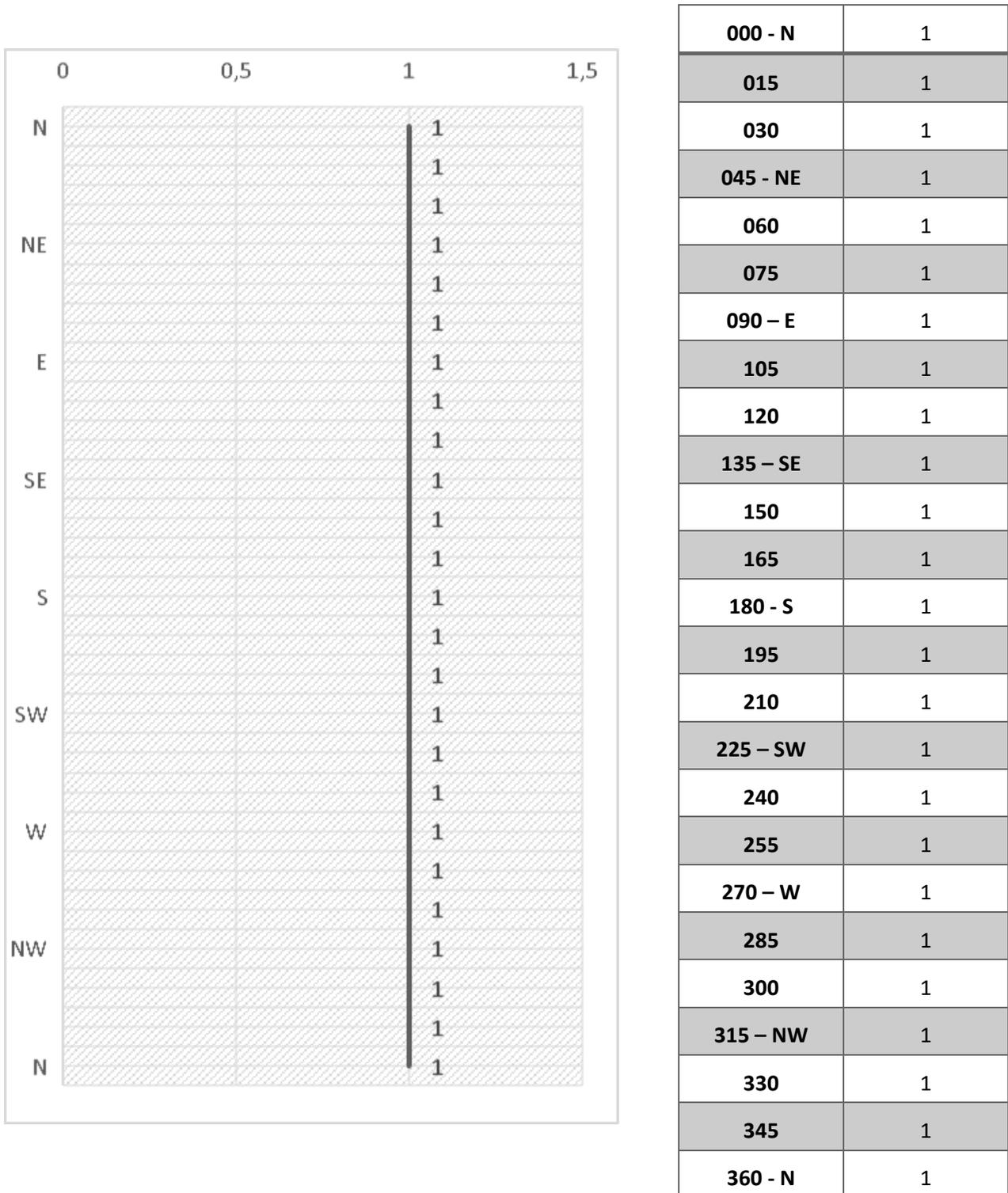
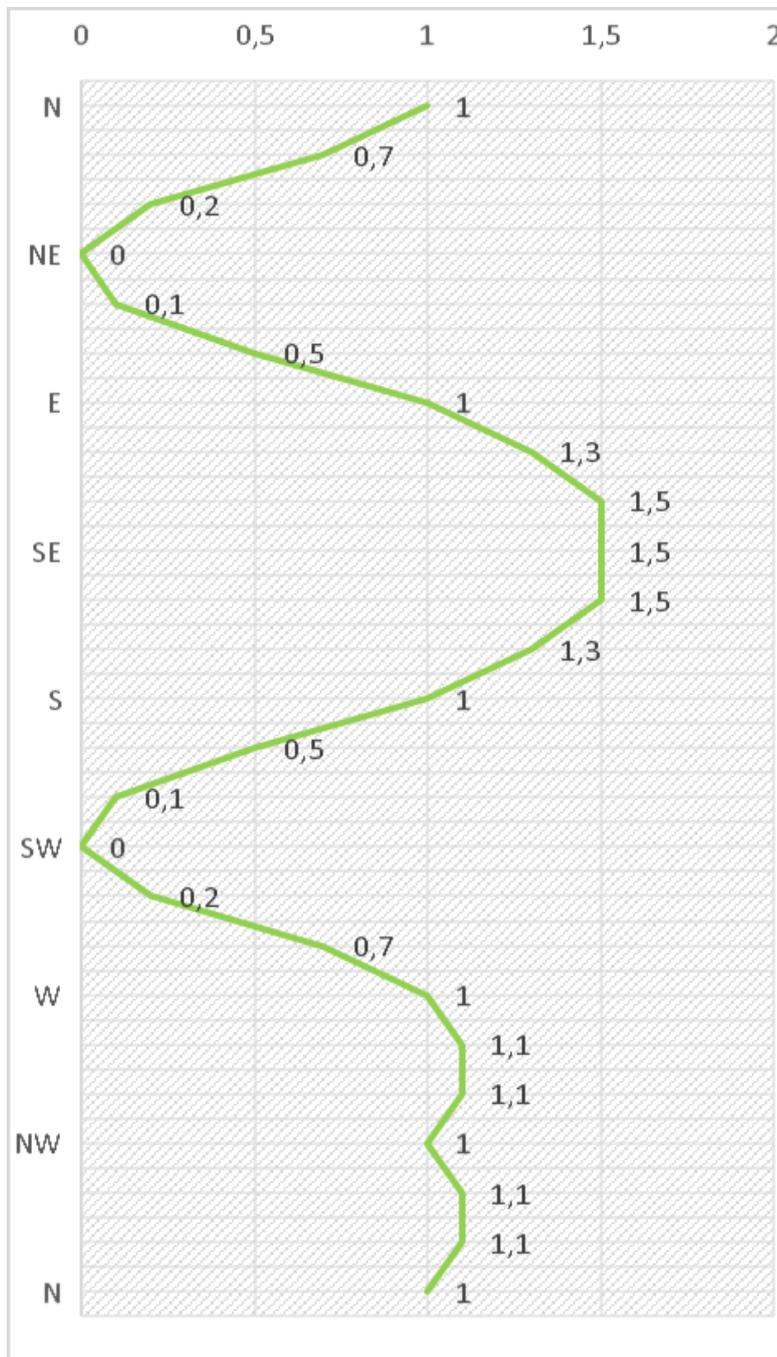


Figura 50. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Höegh Jacksonville).

Tabla 71. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Höegh Jacksonville).

Caso 6: Se aplica la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal.



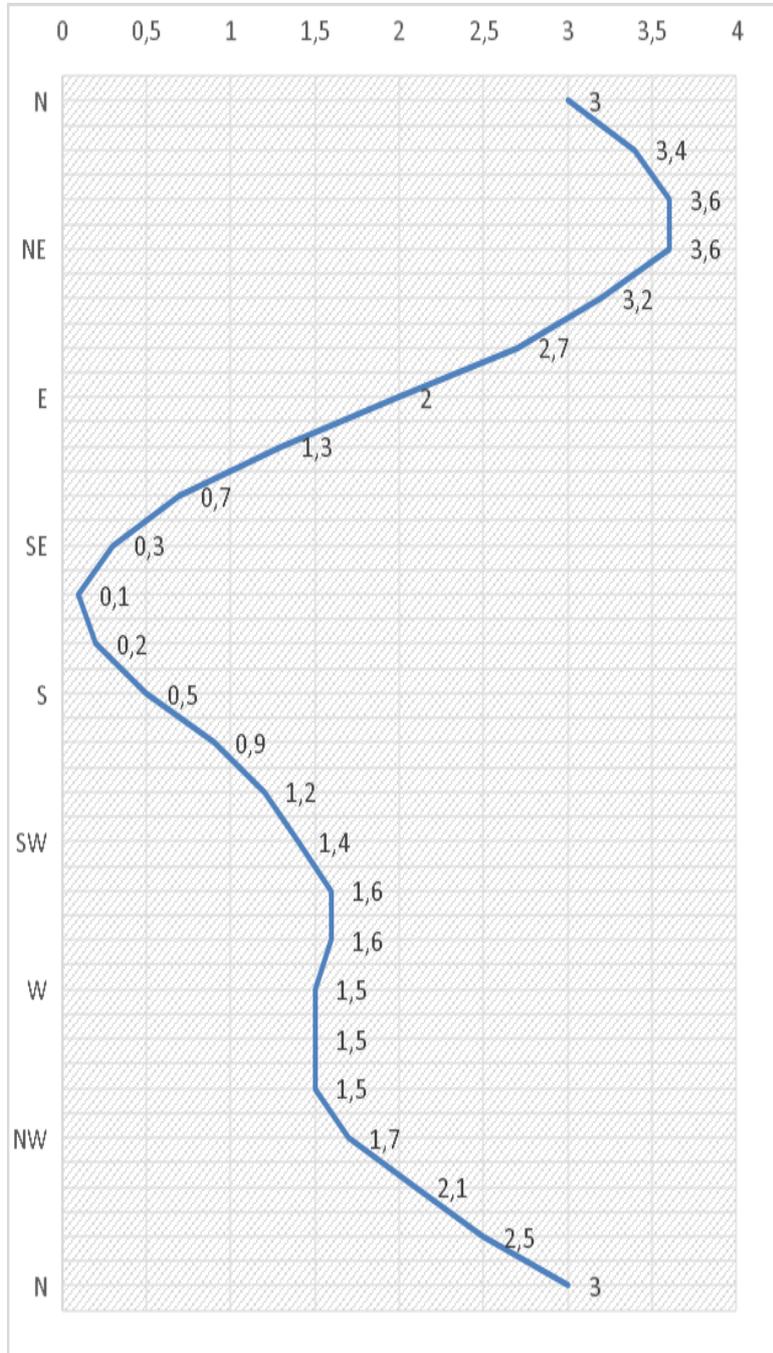
000 - N	1
015	0,7
030	0,2
045 - NE	0
060	0,1
075	0,5
090 - E	1
105	1,3
120	1,5
135 - SE	1,5
150	1,5
165	1,3
180 - S	1
195	0,5
210	0,1
225 - SW	0
240	0,2
255	0,7
270 - W	1
285	1,1
300	1,1
315 - NW	1
330	1,1
345	1,1
360 - N	1

Figura 51. Curva de los desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Höegh Jacksonville).

Tabla 72. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Höegh Jacksonville).

9.6.3 Graficas del yate TALITHA

Caso 1: Se aplica la fórmula práctica del desvío con D medio.

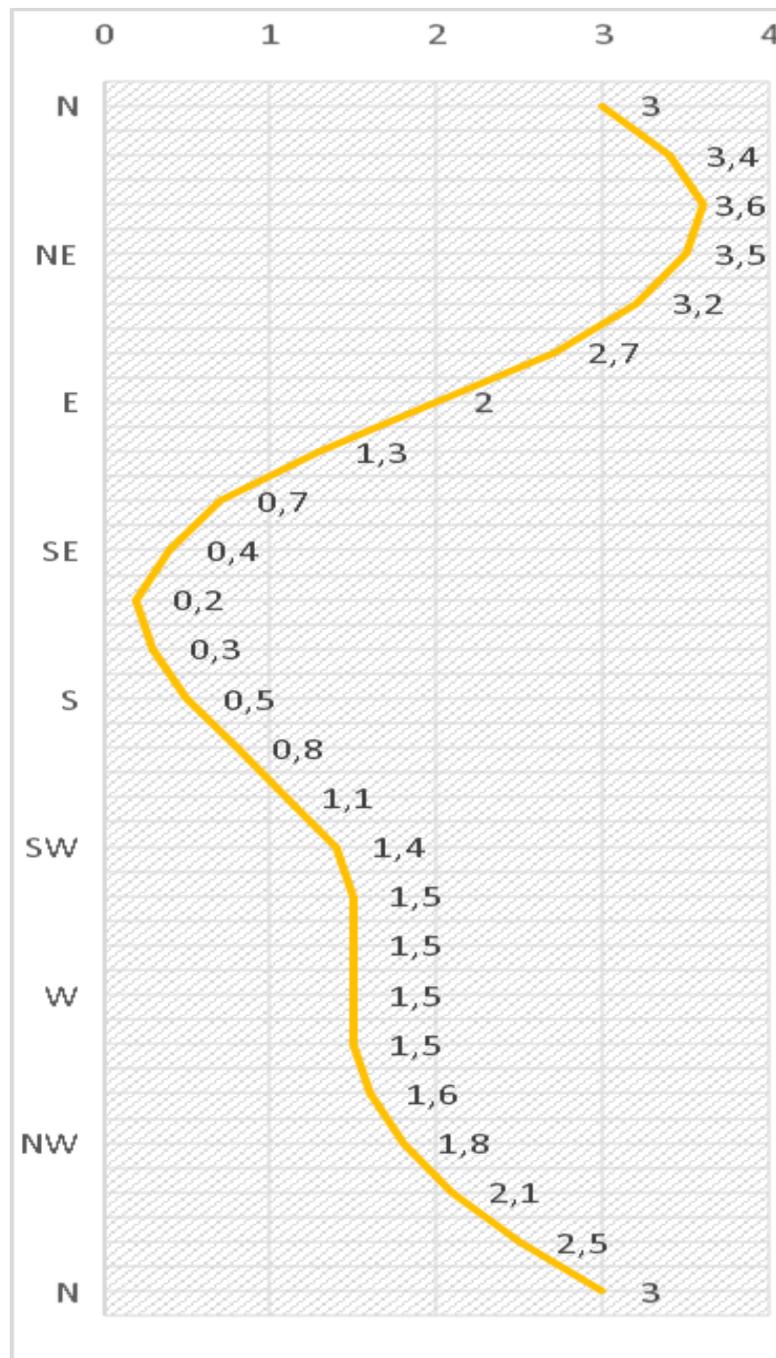


000 - N	3
015	3,4
030	3,6
045 - NE	3,6
060	3,2
075	2,7
090 - E	2
105	1,3
120	0,7
135 - SE	0,3
150	0,1
165	0,2
180 - S	0,5
195	0,9
210	1,2
225 - SW	1,4
240	1,6
255	1,6
270 - W	1,5
285	1,5
300	1,5
315 - NW	1,7
330	2,1
345	2,5
360 - N	3

Figura 52. Curva de los desvíos residuales con el D medio (Talitha).

Tabla 73. Desvíos residuales con el D medio (Talitha).

Caso 2: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NE.



000 - N	3
015	3,4
030	3,6
045 - NE	3,5
060	3,2
075	2,7
090 - E	2
105	1,3
120	0,7
135 - SE	0,4
150	0,2
165	0,3
180 - S	0,5
195	0,8
210	1,1
225 - SW	1,4
240	1,5
255	1,5
270 - W	1,5
285	1,5
300	1,6
315 - NW	1,8
330	2,1
345	2,5
360 - N	3

Figura 53. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Talitha).

Tabla 74. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Talitha).

Caso 3: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SE.

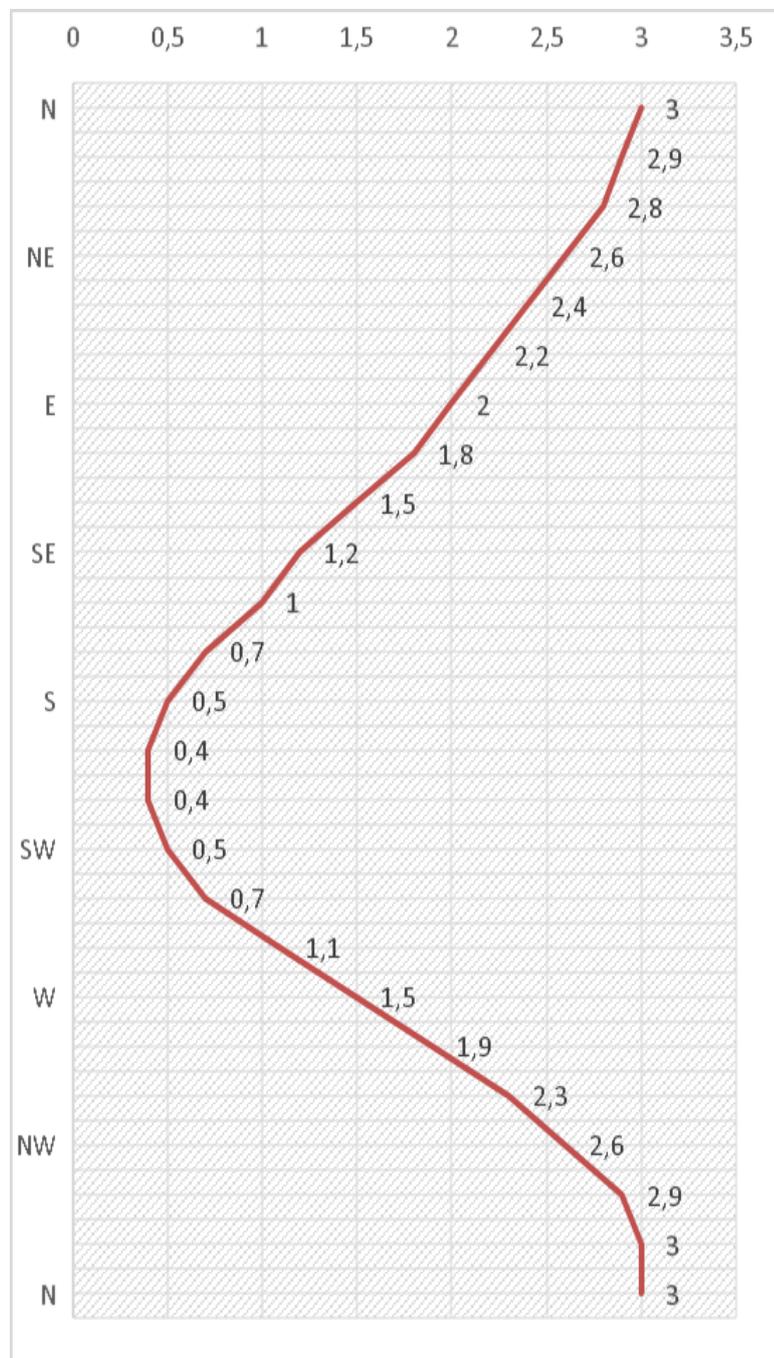


000 - N	3
015	3
030	3
045 - NE	2,9
060	2,6
075	2,3
090 - E	2
105	1,6
120	1,3
135 - SE	1
150	0,8
165	0,6
180 - S	0,5
195	0,5
210	0,6
225 - SW	0,7
240	0,9
255	1,2
270 - W	1,5
285	1,8
300	2,1
315 - NW	2,4
330	2,7
345	2,9
360 - N	3

Figura 54. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Talitha).

Tabla 75. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Talitha).

Caso 4: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SW.

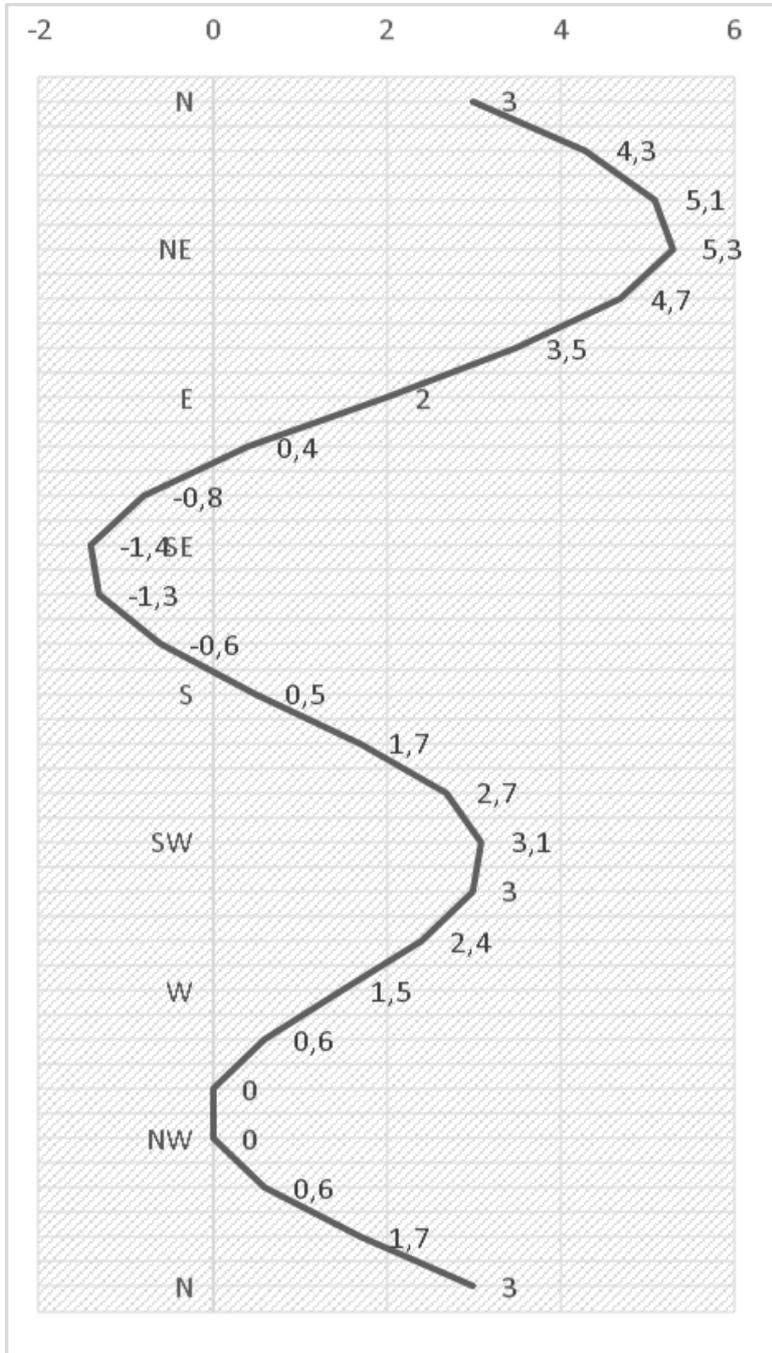


000 - N	3
015	2,9
030	2,8
045 - NE	2,6
060	2,4
075	2,2
090 - E	2
105	1,8
120	1,5
135 - SE	1,2
150	1
165	0,7
180 - S	0,5
195	0,4
210	0,4
225 - SW	0,5
240	0,7
255	1,1
270 - W	1,5
285	1,9
300	2,3
315 - NW	2,6
330	2,9
345	3
360 - N	3

Figura 55. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Talitha).

Tabla 76. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Talitha).

Caso 5: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NW.

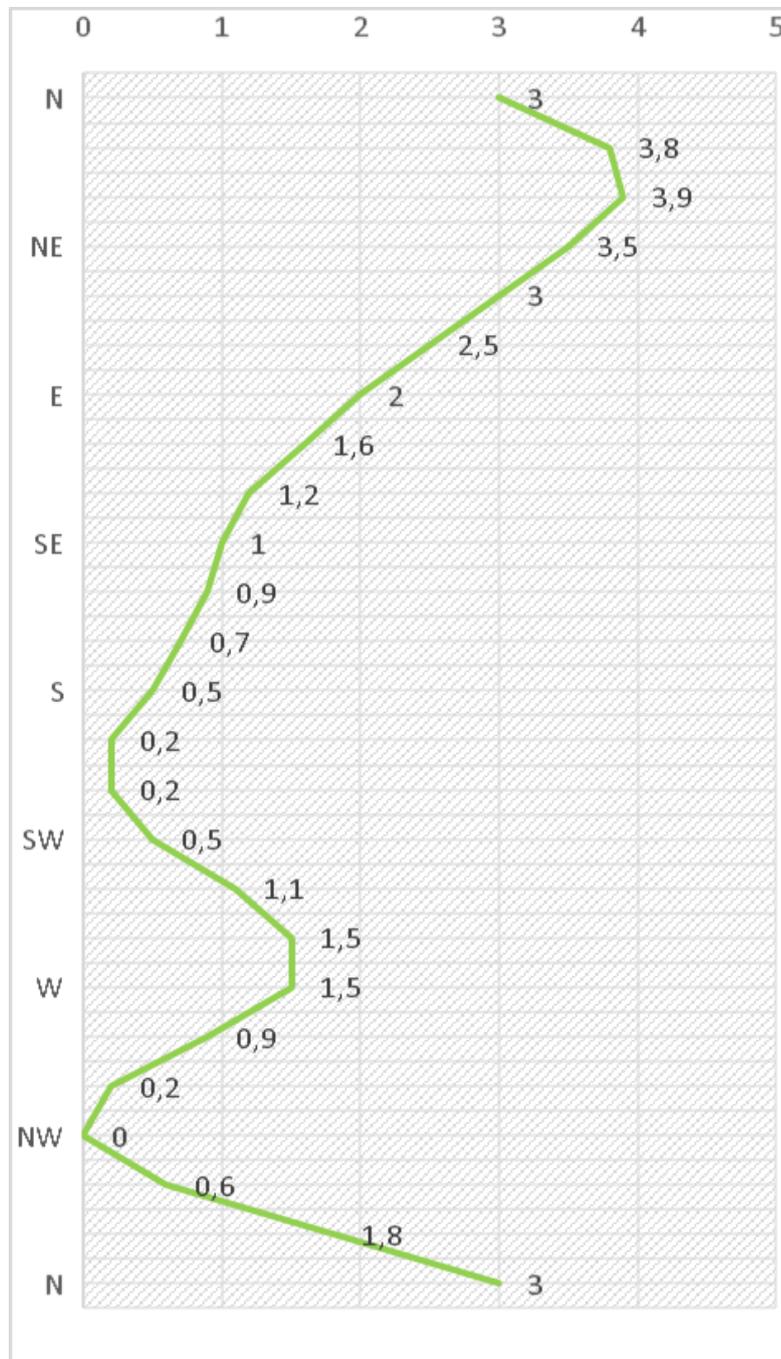


000 - N	3
015	4,3
030	5,1
045 - NE	5,3
060	4,7
075	3,5
090 - E	2
105	0,4
120	-0,8
135 - SE	-1,4
150	-1,3
165	-0,6
180 - S	0,5
195	1,7
210	2,7
225 - SW	3,1
240	3
255	2,4
270 - W	1,5
285	0,6
300	0
315 - NW	0
330	0,6
345	1,7
360 - N	3

Figura 56. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Talitha).

Tabla 77. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Talitha).

Caso 6: Se aplica la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal.



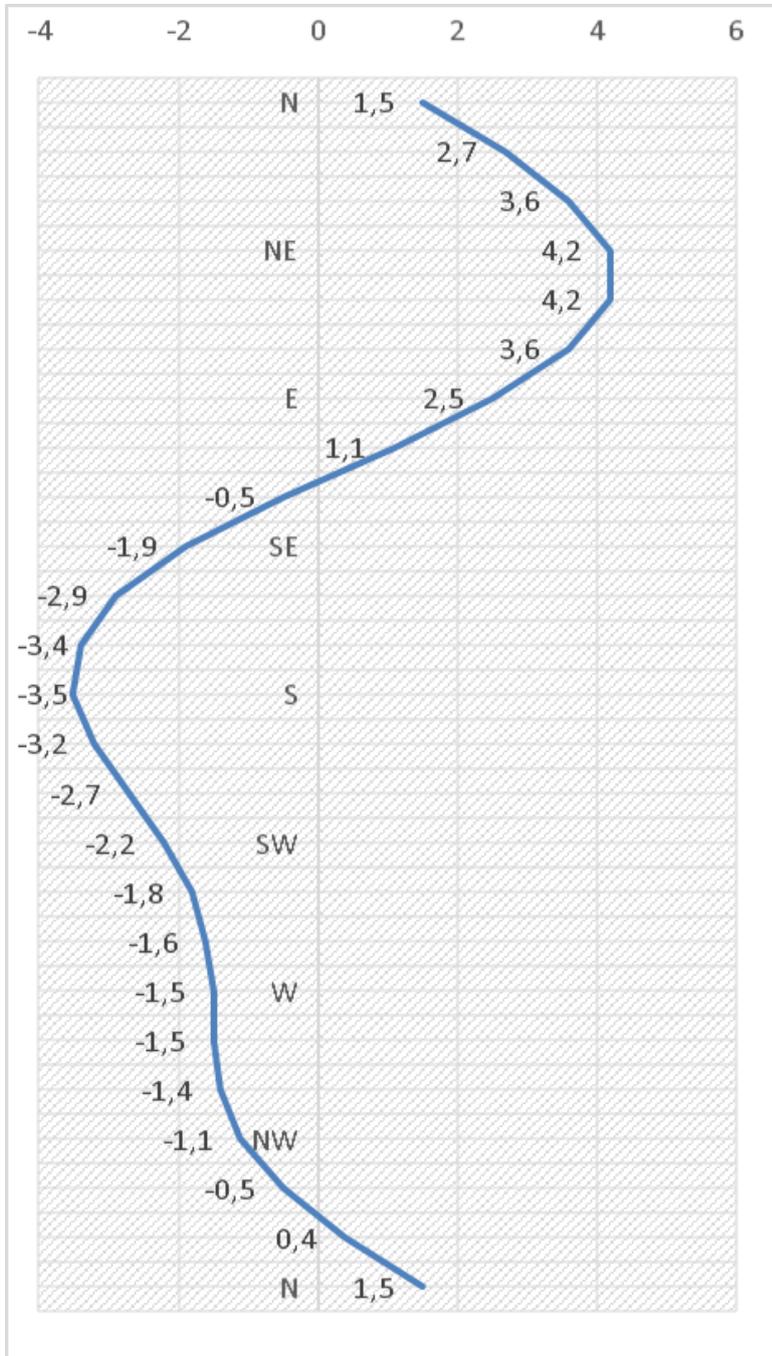
000 - N	3
015	3,8
030	3,9
045 - NE	3,5
060	3
075	2,5
090 - E	2
105	1,6
120	1,2
135 - SE	1
150	0,9
165	0,7
180 - S	0,5
195	0,2
210	0,2
225 - SW	0,5
240	1,1
255	1,5
270 - W	1,5
285	0,9
300	0,2
315 - NW	0
330	0,6
345	1,8
360 - N	3

Figura 57. Curva de los desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Talitha).

Tabla 78. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desv sextantal y octantal (Talitha).

9.6.4 Graficas del yate MAILYN IV

Caso 1: Se aplica la fórmula práctica del desvío con D medio.

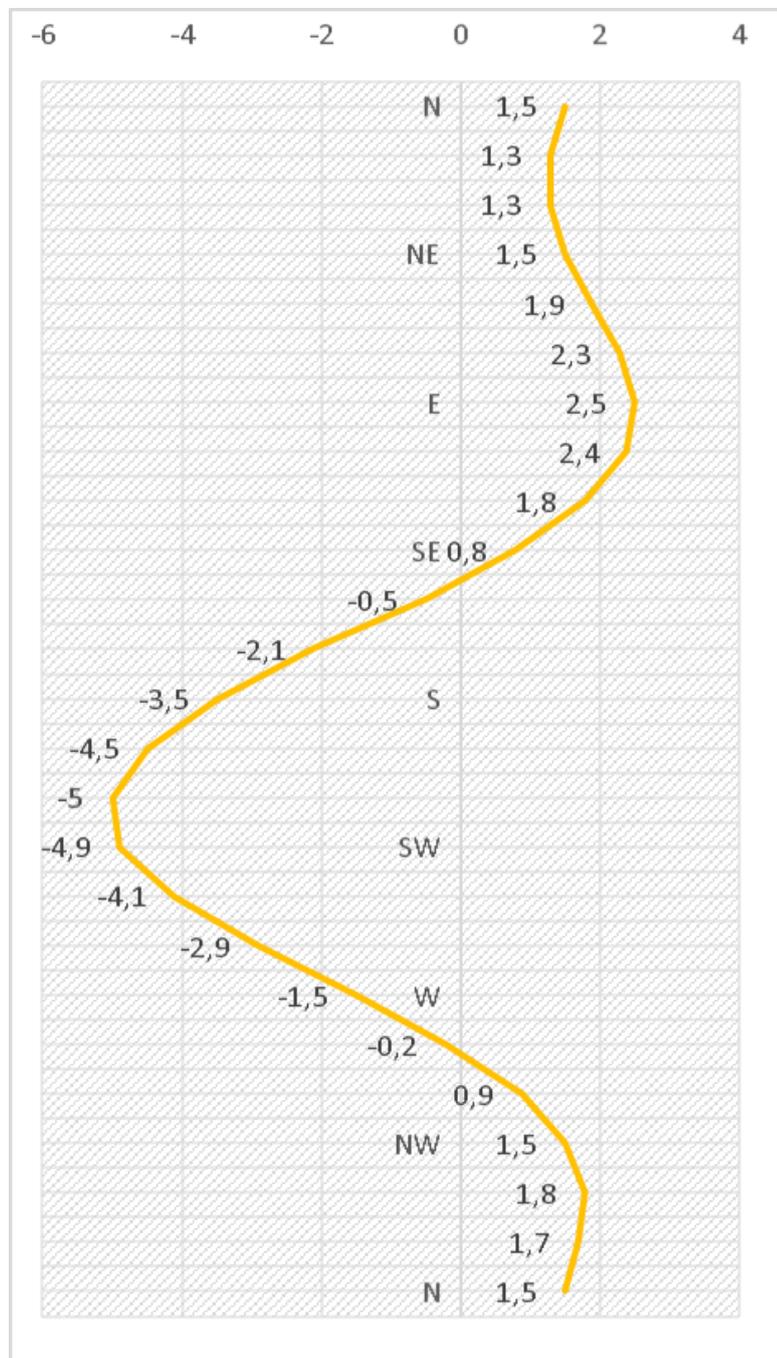


000 - N	1,7
015	2,7
030	3,6
045 - NE	4,2
060	4,2
075	3,6
090 - E	2,5
105	1,1
120	-0,5
135 - SE	-1,9
150	-2,9
165	-3,4
180 - S	-3,5
195	-3,2
210	-2,7
225 - SW	-2,2
240	-1,8
255	-1,6
270 - W	-1,5
285	-1,5
300	-1,4
315 - NW	-1,1
330	-0,5
345	0,4
360 - N	1,5

Figura 58. Curva de los desvíos residuales con el D medio (Mailyn IV).

Tabla 79. Desvíos residuales con el D medio (Mailyn IV).

Caso 2: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NE.

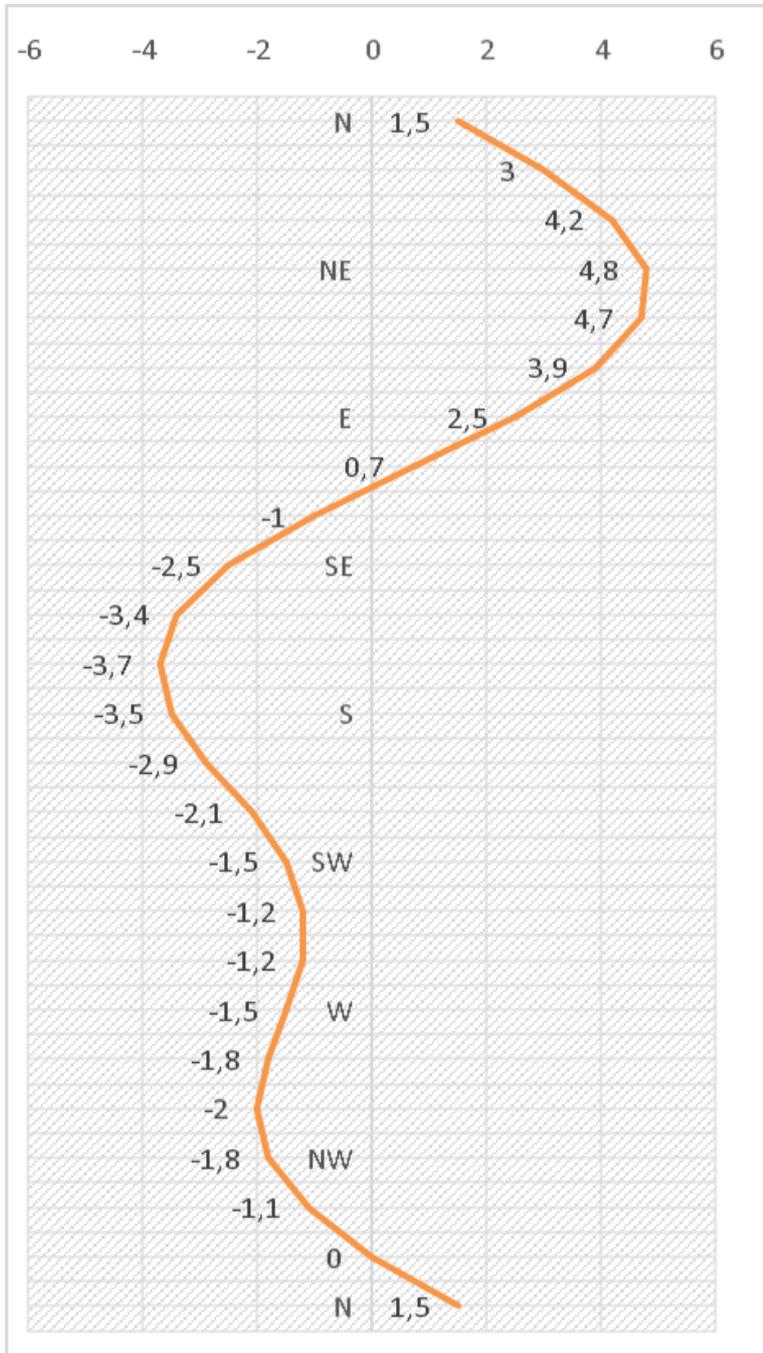


000 - N	1,5
015	1,3
030	1,3
045 - NE	1,5
060	1,9
075	2,3
090 - E	2,5
105	2,4
120	1,8
135 - SE	0,8
150	-0,5
165	-2,1
180 - S	-3,5
195	-4,5
210	-5
225 - SW	-4,9
240	-4,1
255	-2,9
270 - W	-1,5
285	-0,2
300	0,9
315 - NW	1,5
330	1,8
345	1,7
360 - N	1,5

Figura 59. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Maily IV).

Tabla 80. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NE (Maily IV).

Caso 3: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SE.

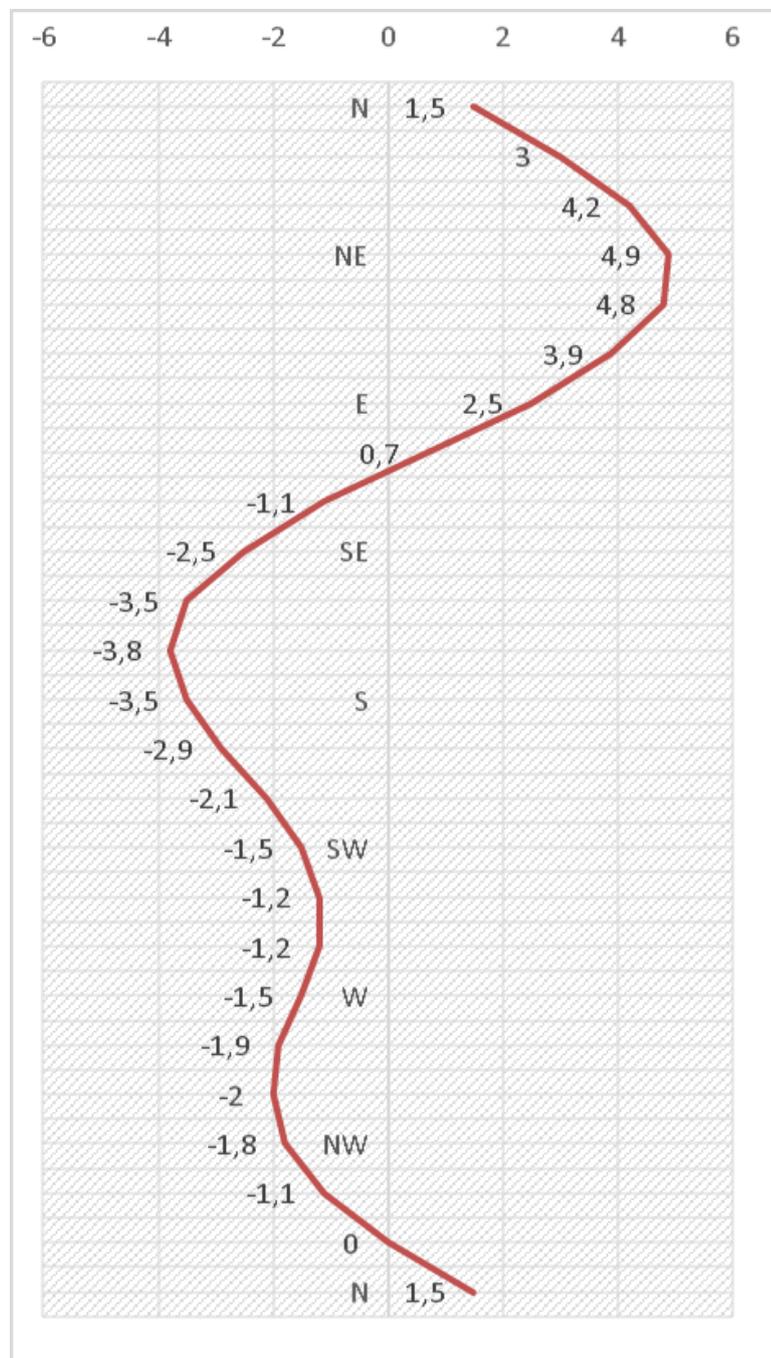


000 - N	1,5
015	3
030	4,2
045 - NE	4,8
060	4,7
075	3,9
090 - E	2,5
105	0,7
120	-1
135 - SE	-2,5
150	-3,4
165	-3,7
180 - S	-3,5
195	-2,9
210	-2,1
225 - SW	-1,5
240	-1,2
255	-1,2
270 - W	-1,5
285	-1,8
300	-2
315 - NW	-1,8
330	-1,1
345	0
360 - N	1,5

Figura 60. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Mailyn IV).

Tabla 81. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SE (Mailyn IV).

Caso 4: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal SW.

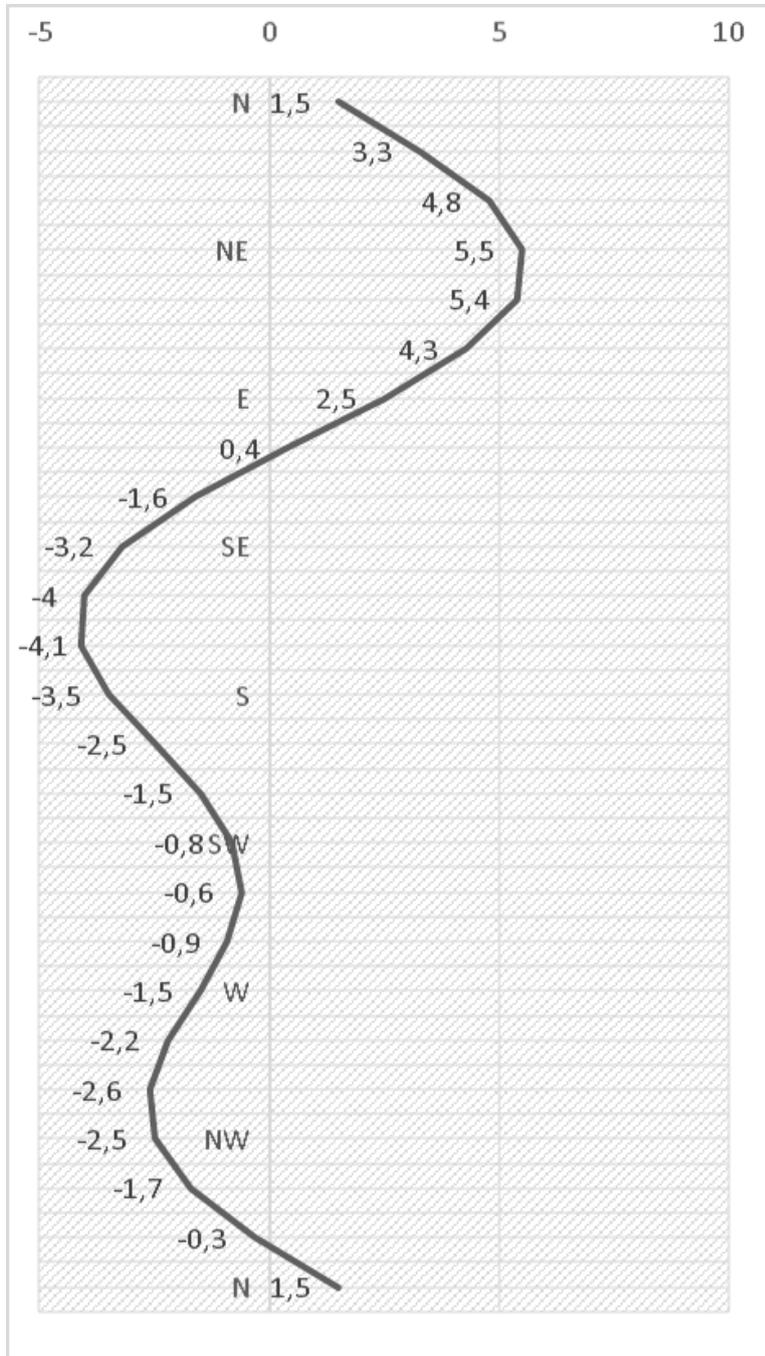


000 - N	1,5
015	3
030	4,2
045 - NE	4,9
060	4,8
075	3,9
090 - E	2,5
105	0,7
120	-1,1
135 - SE	-2,5
150	-3,5
165	-3,8
180 - S	-3,5
195	-2,9
210	-2,1
225 - SW	-1,5
240	-1,2
255	-1,2
270 - W	-1,5
285	-1,9
300	-2
315 - NW	-1,8
330	-1,1
345	0
360 - N	1,5

Figura 61. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Maily IV).

Tabla 82. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal SW (Maily IV).

Caso 5: Se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NW.

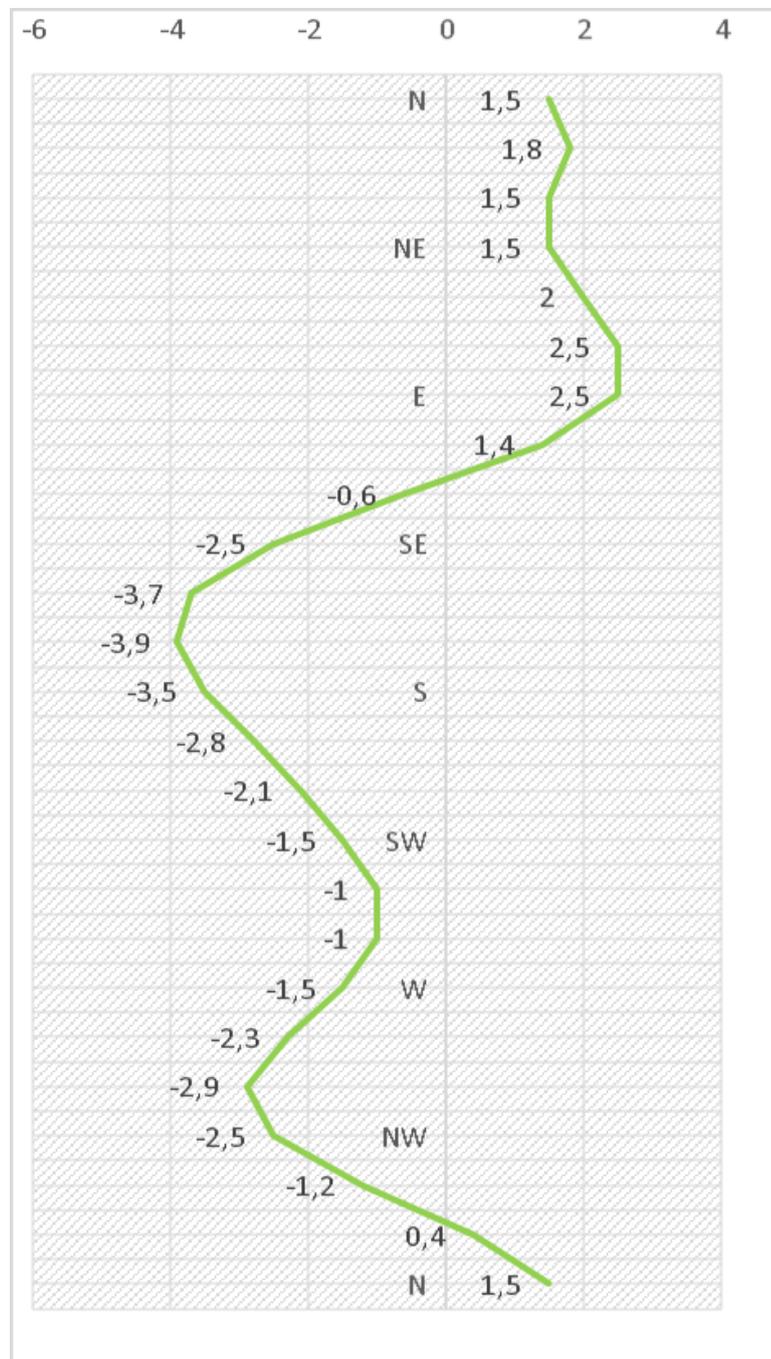


000 - N	1,5
015	3,3
030	4,8
045 - NE	5,5
060	5,4
075	4,3
090 - E	2,5
105	0,4
120	-1,6
135 - SE	-3,2
150	-4
165	-4,1
180 - S	-3,5
195	-2,5
210	-1,5
225 - SW	-0,8
240	-0,6
255	-0,9
270 - W	-1,5
285	-2,2
300	-2,6
315 - NW	-2,5
330	-1,7
345	-0,3
360 - N	1,5

Figura 62. Curva de los desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Mailyn IV).

Tabla 83. Desvíos residuales con 4 rumbos cardinales y el cuadrantal NW (Mailyn IV.)

Caso 6: Se aplica la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal.



000 - N	1,5
015	1,8
030	1,5
045 - NE	1,5
060	2
075	2,5
090 - E	2,5
105	1,4
120	-0,6
135 - SE	-2,5
150	-3,7
165	-3,9
180 - S	-3,5
195	-2,8
210	-2,1
225 - SW	-1,5
240	-1
255	-1
270 - W	-1,5
285	-2,3
300	-2,9
315 - NW	-2,5
330	-1,2
345	0,4
360 - N	1,5

Figura 63. Curva de los desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Maily IV).

Tabla 84. Desvíos residuales con la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal (Maily IV).

Capítulo 10. Conclusiones

Una vez se han obtenido las tablillas y las gráficas de los desvíos residuales para los seis casos en cada uno de los cuatro buques que se han analizado, se ha llegado a las siguientes conclusiones.

10.1 Primera conclusión

Considerando el coeficiente D medio, los rumbos cuadrantales no coinciden, pero los errores se minimizan. En las curvas de las Figuras 38, 44, 50 y 56 (gráficas obtenidas con el D medio), se observa que: en ninguna gráfica, coincide el desvío residual calculado con el desvío inicial de los desvíos cuadrantales. Sin embargo, no se obtienen desvíos notablemente diferentes a los iniciales. Asimismo, la amplitud de estas gráficas es menor que las otras, lo que indica que minimiza los posibles errores.

10.2 Segunda conclusión

Ajustando la gráfica al valor del desvío a un rumbo cuadrantal, se pueden producir severos cambios en la curva, de manera que se obtengan desvíos a los otros rumbos cuadrantales muy diferentes a los desvíos iniciales. Por ejemplo: en el apartado 9.3.5 (correspondiente a los desvíos del buque Höegh Jacksonville), se aplica la fórmula práctica con 5 rumbos: 4 cardinales y el cuadrantal NW. En este caso, el coeficiente D es el resultado del cálculo con el desvío cuadrantal al NW, y como se observa, la gráfica de la Figura 48 es una línea recta, difiriendo de una gráfica más aproximada a la real como podría ser la de la Figura 46.

10.3 Tercera conclusión

Análisis de los resultados usando la fórmula con los 5 coeficientes y la fórmula completa con los desvíos sextantal y octantal:

En los cuatro buques se han hecho los cálculos con cinco casos distintos (coeficiente D medio, y 4 cardinales y un cuadrantal) y luego con la fórmula completa, y se ha observado que este es el único caso en el que coinciden los valores iniciales de los desvíos cardinales y cuadrantales con los desvíos residuales calculados. Esto se observa en los siguientes casos:

- Buque Allure of the Seas: los valores de la Tabla 9, correspondientes a los desvíos iniciales, coinciden con los desvíos residuales calculados de la Tabla 21.
- Buque Höegh Jacksonville: los valores de la Tabla 22, correspondientes a los desvíos iniciales, coinciden con los desvíos residuales calculados de la Tabla 34.

- Yate Talitha: los valores de la Tabla 35, correspondientes a los desvíos iniciales, coinciden con los desvíos residuales calculados de la Tabla 47.
- Yate Maily IV: los valores de la Tabla 48, correspondientes a los desvíos iniciales, coinciden con los desvíos residuales calculados de la Tabla 60.

10.4 Cuarta conclusión

En los cuatro casos en los que se calculan los desvíos residuales con los rumbos cardinales y un cuadrantal, se observa que tres gráficas son parecidas, pero una que es bastante diferente a las demás. Por ejemplo: observando las gráficas del buque Maily IV, las Figuras 58, 59 y 60, correspondientes a los cuadrantales SE, SW y NW, son bastante parecidas; mientras que la Figura 57, correspondiente al rumbo cuadrantal NE, no se asemeja a ellas. El motivo de este fenómeno es desconocido, pero ocurre en los cuatro buques. Conforme al desarrollo de este TFG, se atribuye a la incidencia de los desvíos sextantal y octantal, siendo el rumbo que se desajusta aquel donde la incidencia de la suma de estos dos desvíos es mayor.

10.5 Quinta conclusión

Considerando los desvíos sextantal y octantal, la curva no queda bien modulada. Esto se puede observar en las Figuras 43, 49, 55 y 61. El hecho de que estas gráficas no queden bien moduladas, lo atribuimos a pequeños errores al observar alguno de los desvíos o al llevar el rumbo. Si bien estos errores son pequeños, menores de $0,5^\circ$, porcentualmente son grandes, puesto que los desvíos residuales no suelen superar los 3° . En definitiva, aunque todos los desvíos calculados coinciden con los desvíos iniciales, no creemos que sea la curva más adecuada para anexar al certificado de compensación.

Bibliografía

- [1] Centro Nacional de Formación Ocupacional Marítima de Bamio–Villagarcía (2010). *Curso de compensadores de agujas náuticas*. Minsiterio. Bamio: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales–Instituto Social de la Marina; Fondo Social Europeo
- [2] Chulliat, A. et al. (2020). *The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025 (WMM 2020-2025): Technical Report*. National Centers for Environmental Information, NOAA. DOI 10.25923/ytk 1-yx35
- [3] Moréu Curbera; Martínez Jiménez (1987). *Astronomía y navegación. Tomo III: curso de capitanes*. 3ª ed. Vigo: los autores. Capítulos LXIX–LXXX (pp. 60–206), pp. 329–330. ISBN 8485645014
- [4] Moyano Sanz, S. (2009). *Apuntes de compensación de agujas náuticas*. Facultat de Nàutica de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya
- [5] Gaztelu-Iturri Leicea, R. (1999). *Compensación de la aguja náutica: curso de compensador*. Vitoria: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. ISBN 8445715070
- [6] Gonzalez La Flor, F. (2016). *Magnetismo a bordo y compensación de agujas náuticas*. Facultat de Nàutica de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya
- [7] IMO (1977). *Resolución A.382(X): Compases magnéticos: emplazamiento a bordo y normas de rendimiento*
- [8] ISO. *Standard 1069:1973: Magnetic compasses and binnacles for sea navigation–Vocabulary*
- [9] ISO. *Standard 25862:2019: Ships and marine technology: marine magnetic compasses, binnacles and azimuth reading devices*
- [10] Martínez-Lozares, A. et al. (2011). *La aguja magnética y su compensación: comportamiento de la aguja náutica*. Editorial Académica Española. ISBN-10: 3846565601; ISBN-13: 9783846565605
- [11] Ministerio de Obras Públicas y Transportes. *Orden ministerial de 14 de diciembre de 1992 sobre compensación de agujas náuticas*. «BOE» núm. 7, de 8 de enero de 1993, pp. 416–418 (ref. BOE–A–1993–457)
- [12] National Geospatial–Intelligence Agency (2004). *Handbook of magnetic compass adjustment* (Formerly Pub. No. 226). Bethesda (Maryland, E.U.A.).
- [13] Ramsden San Juan, N. (2015). *Análisis de los desvíos de una aguja náutica mediante el estudio de sus valores cuadrantales* (TFM). E.T.S. de Náutica y Máquinas Navales. Universidad del País Vasco
- [14] <http://www.professionalmariner.com/December-January-2014/compass/> [marzo 2020]
Swinging a compass (26/11/2013). *Professional Mariner*, December-January 2014.

