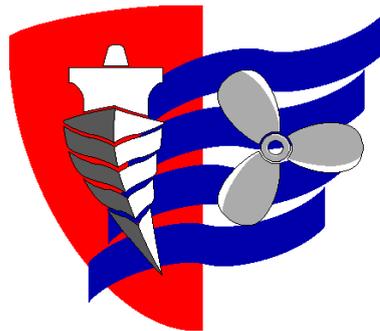


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

Metodología para emplear Excel en la resolución de cálculos de navegación. Aplicación a la evaluación del Radiogoniómetro como Sistema Mundial de Navegación.

**Methodology to use Excel in the resolution of navigation
calculations. Application to evaluate the radio direction-
finder as a Global Navigation System.**

**Para acceder al Título de Máster Universitario en:
Ingeniería Náutica y Gestión Marítima**

Autor: José Manuel García Lamela
Director: Francisco José Sánchez Díaz de la Campa
Julio-2018

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Máster

Metodología para emplear Excel en la resolución de cálculos de navegación. Aplicación a la evaluación del Radiogoniómetro como Sistema Mundial de Navegación

**Methodology to use Excel in the resolution of navigation
calculations. Application to evaluate the radio direction-
finder as a Global Navigation System.**

**Para acceder al Título de Máster Universitario en:
Ingeniería Náutica y Gestión Marítima**

AVISO DE RESPONSABILIDAD:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Máster de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Máster, así como el profesor/a director no son responsables del contenido último de este Trabajo.

Índice

Índice.....	I
Resumen y Palabras clave.....	III
I.- INTRODUCCIÓN.....	1
II.- MEMORIA DESCRIPTIVA.....	2
II.1.- Planteamiento del problema	2
II.1.1.- Planteamiento del problema.....	2
II.1.2.- Hipótesis de partida y de resultado (objetivos).....	2
II.2.- Herramientas de resolución.	4
II.2.1.- Planteamiento general de la Aplicación práctica	4
II.2.2.- Fórmulas de la trigonometría esférica.	6
II.2.3.- Microsoft Excel.	7
II.2.4.- Flujogramas.....	7
II.2.5.- Resolución A 953(23) (OMI, 2003).....	7
II.3.- Metodología	9
II.3.1.- Resolución de un problema de trigonometría esférica	9
II.3.2.- Introducir un problema de trigonometría esférica en Excel.	11
III.- APLICACIÓN PRÁCTICA.....	14
III.1.- Introducción	14
III.2.- Resolución de un problema de trigonometría esférica.....	14
III.2.1.- Convertir Datos-Entradas a Datos Esféricos.....	14
III.2.2.- Identificar el caso.	15
III.2.3.- Análisis de los casos particulares y de las dobles soluciones de cada fórmula.	17
III.2.4.- Conversión a Longitud del ángulo en el polo y tratamiento general de las diferencias en longitud.	19
III.3.- Introducir un problema de trigonometría esférica en Excel.....	20
III.3.1.- Transformar las entradas y las salidas.....	20
III.3.2.- Comprobar los recorridos de las funciones trigonométricas inversas.....	22

III.3.3.- Dedicar una hoja a la entrada y salida de datos.....	24
III.3.4.- Realizar el tratamiento informático de los flujogramas.	25
IV.- CONCLUSIONES.....	32
IV.1.- Resultados del capítulo de Aplicación práctica.	32
IV.2.- Resúmenes de la utilidad de la metodología.	32
IV.3.- Consejos para aplicar la metodología.....	32
IV.4.- Posibles líneas de indagación futuras.....	32
Referencias citadas.....	34
ANEXOS	35

Resolución A 953(23) de la OMI

Resumen y Palabras clave

Resumen

El objeto de este trabajo es diseñar y probar una metodología para construir hojas de cálculo que resuelvan problemas de navegación y, más concretamente, de trigonometría esférica. La metodología emplea los flujogramas para representar el problema a resolver y, posteriormente, se traduce dicho flujograma a fórmulas dentro de la hoja de cálculo.

Queremos destacar, dentro de dicha metodología, la herramienta que permite traducir los diamantes de decisión de los flujogramas a funciones SI anidadas que se introducen en la hoja de cálculo.

En el capítulo de Aplicación práctica, la metodología se pondrá a prueba con los cálculos necesarios para comprobar si el Radiogoniómetro es un posible SISTEMA MUNDIAL DE RADIONAVEGACIÓN atendiendo a la Resolución A.953(23) adoptada el 5 de diciembre de 2003 (OMI, 2003).

En la Aplicación práctica se resuelve el caso de triángulo esférico en el que se asume que un buque emite una señal que se recibirá por una estación costera, mientras que, casi simultáneamente o en otro canal o frecuencia, la estación costera emite su señal que es recibida por el buque. Esto da lugar a un caso en el que se tienen dos ángulos del triángulo (las radiodemoras) y un lado (la colatitud de la estación costera), determinándose, a partir de ello, el ángulo en el polo y la colatitud del buque.

Abstract

The purpose of this paper is to design and test a methodology to build spreadsheets that solve navigation problems and, more specifically, spherical trigonometry. The methodology uses the flow charts to represent the problem to be solved and, subsequently, the flow chart is translated into formulas within the spreadsheet.

We want to highlight, within this methodology, the tool that allows to translate decision diamonds from flow charts to nested IF functions that are entered in the spreadsheet.

In the chapter on Practical Application, the methodology will be tested with the necessary calculations to check the Direction Finder as a possible WORLD RADIO NAVIGATION SYSTEM, in compliance with Resolution A.953 (23) adopted on December 5, 2003 (IMO, 2003).

In the Practical Application the case of a spherical triangle is solved in which it is assumed that a ship emits a signal that will be received by a coastal station, while, almost simultaneously or in another channel or frequency, the coast station emits its signal that is received by the ship. This gives rise to a case in which there are two angles of the triangle (the radio bearings) and one side (the colatitude of the coastal station), determining from this, the angle at the pole and the vessel's colatitude.

Palabras clave:

Trigonometría Esférica

Radiogoniómetro

Radionavegación

Sistema de Posicionamiento

Excel

Keywords

Spherical Trigonometry

Direction Finder

Radio Navigation

Positioning System

Excel

I.- INTRODUCCIÓN

El objeto de este trabajo es diseñar y probar una metodología para construir hojas de cálculo que resuelvan problemas de navegación y, más concretamente, de trigonometría esférica. La metodología emplea los flujogramas para representar el problema a resolver y, posteriormente, se traduce dicho flujograma a fórmulas dentro de la hoja de cálculo.

Queremos destacar, dentro de dicha metodología, la herramienta que permite traducir los diamantes de decisión de los flujogramas a funciones SI anidadas que se introducen en la hoja de cálculo.

En el capítulo de Aplicación práctica, la metodología se pondrá a prueba con los cálculos necesarios para comprobar si el Radiogoniómetro es un posible SISTEMA MUNDIAL DE RADIONAVEGACIÓN atendiendo a la Resolución A.953(23) adoptada el 5 de diciembre de 2003 (OMI, 2003).

En la Aplicación práctica se resuelve el caso de triángulo esférico en el que se asume que un buque emite una señal que se recibirá por una estación costera, mientras que, casi simultáneamente o en otro canal o frecuencia, la estación costera emite su señal que es recibida por el buque. Esto da lugar a un caso en el que se tienen dos ángulos del triángulo (las radiodemoras) y un lado (la colatitud de la estación costera), determinándose, a partir de ello, el ángulo en el polo y la colatitud del buque.

II.- MEMORIA DESCRIPTIVA.

II.1.- Planteamiento del problema

II.1.1.- Planteamiento del problema

Se pretende desarrollar una metodología para resolver cálculos de navegación empleando Microsoft Excel (fundamentalmente aplicada a la trigonometría esférica). La metodología se pondrá a prueba con los cálculos necesarios para comprobar si el Radiogoniómetro es un posible SISTEMA MUNDIAL DE RADIONAVEGACIÓN atendiendo a la Resolución A.953(23) adoptada el 5 de diciembre de 2003 (OMI, 2003).

Para realizar este trabajo partimos de los conocimientos de Excel impartidos en el Máster en Ingeniería Náutica y Gestión Marítima de la Universidad de Cantabria en la signatura Formación Investigadora (Sánchez Díaz de la Campa, 2017), y de los conocimientos de Flujogramas impartidos en el mismo Máster en la asignatura Sistemas Integrados de Gestión y que pueden documentarse además en el libro Mejora Continua de Procesos (Galloway, 2002).

Los fundamentos de trigonometría esférica están obtenidos principalmente de: Trigonometría Esférica-Teoría y Problemas Resueltos de M^a Asunción Iglesias (Martín, 2004, pp. 164-170), Fundamentos de Navegación Marítima de (Itsaso & Gaztelu-Iturri, 2002), Trigonometría Esférica Fundamentos (Barrero Ripoll, et al., 2008) y Trigonometría Plana y Esférica de (Frank Ayres, 1987).

La Hoja de cálculo diseñada en el capítulo de Aplicación práctica tiene como fin operar los datos de campo de un Radiogoniómetro para evaluar la precisión de un sistema basado en este principio.

II.1.2.- Hipótesis de partida y de resultado (objetivos)

II.1.2.1.- Hipótesis de partida.

1. Los cálculos de navegación no necesitan mayor precisión que la aportada por las fórmulas empleadas de trigonometría esférica habitualmente empleadas en la navegación.
2. Se dispone de un radiogoniómetro en el buque que recibe las emisiones actuales de la banda de HF.

3. Se asume que las ondas de la banda de HF emitidas por los radiofaros se transmiten siguiendo un arco de círculo máximo.
4. Las lecturas radiogoniométricas entregan valores iguales a los ángulos esféricos. Para frecuencias HF (3 a 30 MHz) pueden considerarse errores próximos a 0.2 grados (Rohde & Schwarz, 2015).
5. Las entradas al problema son las lecturas radiogoniométricas, que nos entregan dos ángulos esféricos del triángulo a resolver, siendo estas las variables independientes del sistema.
6. Con los datos conocidos de la latitud (φ) y longitud (λ) de una estación costera y las entradas, se obtienen tres datos del triángulo esférico (se necesitan tres para obtener los otros tres).
7. Las operaciones con la hoja de cálculo diseñada se realizarán de forma automática.

II.1.2.2.- Hipótesis de resultado

1. La primera hoja del archivo dispone de una **zona de entrada de datos**. Todos los cálculos del problema se rehacen al cambiar el contenido de la zona de entrada de datos.
2. La primera hoja del archivo dispone de una **zona para la salida de resultados**. Las celdas de esta zona entregan la latitud y longitud de del buque.
3. Ambas zonas muestran las latitudes y longitudes en grados y minutos sexagesimales, y el signo se indica con las letras "S", "N", "E", "W".
4. La hoja de cálculo trata casos particulares y dobles soluciones.
5. Se comprobará la precisión de las situaciones obtenidas por radiogoniómetro comparándolas con las simultáneas de GPS.

II.2.- Herramientas de resolución.

II.2.1.- Planteamiento general de la Aplicación práctica

Se plantean dos casos a resolver. Ambos basados en determinar la posición del buque empleando dos demoras radiogoniométricas. El primero requiere de un radiogoniómetro abordo y el segundo usa los de dos estaciones costeras.

Las lecturas de los radiogoniómetros instalados en tierra tienen más precisión. La posibilidad de sobredimensionamiento de las antenas disminuye el error. El no estar expuestas a los movimientos a los que está sometido el buque reduce desajustes de calibración. Sistemas más sofisticados pueden ser instalados en las estaciones costeras, siendo el radiogoniómetro una herramienta de uso común en estas y no tanto en los buques. Pero un sistema de comunicación en las bandas de HF es de obligada instalación para los buques que naveguen en áreas GMDSS A3 y A4 (Organización Marítima Internacional, OMI, 2002, p. 374 a 383). La demora de las costeras puede ser enviada por estos medios tras recibir la señal.



Imagen 1: Extraída de (Rohde & Schwarz, 2015). Izquierda: super-resolution HF DF antenna.

Los dos planteamientos requieren las demoras registradas por dos radiogoniómetros, siendo los ángulos entregados por estos las variables independientes. Siendo los datos conocidos la latitud y longitud de las estaciones costeras.

A continuación, se expone el planteamiento para la resolución del caso con dos estaciones, siendo el sistema con una estación más ampliamente abordado en el apartado de Aplicación Práctica (“Identificar el caso” III.2.2.-), al presentar este dobles soluciones y casos particulares que requieren un mayor tratamiento.

Partiendo de los datos conocidos de las latitudes y longitudes de las estaciones costeras, y los valores de las lecturas radiogoniométricas de ambas estaciones de la señal transmitida por la estación móvil (Δ) a posicionar, entregaría como solución la latitud y longitud de esta.

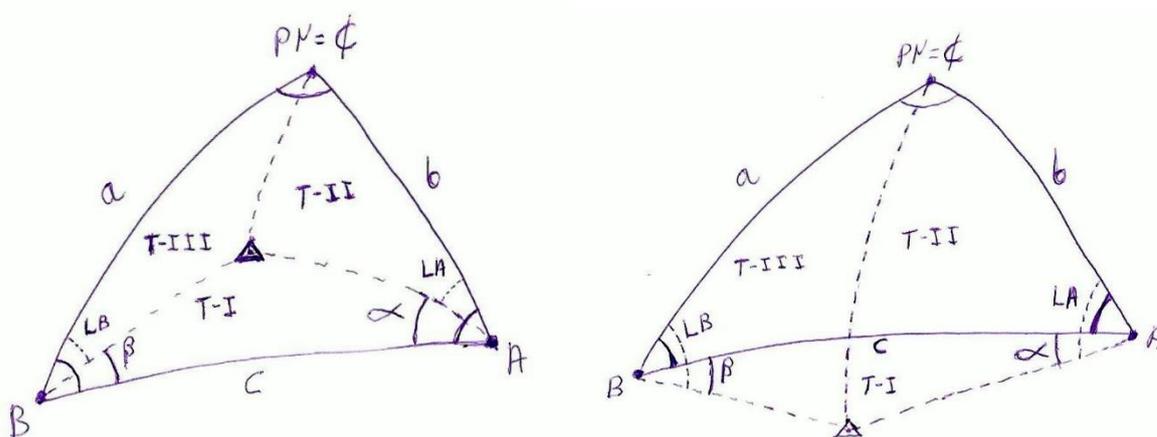


Figura 1: Elaboración propia.

Contando con la latitud y longitud de los puntos **A** y **B** (estaciones costeras) del triángulo esférico exterior quedarían determinados todos sus datos. Obteniéndose el lado **c** y los ángulos en los vértices **A** y **B**.

Introduciendo en la hoja de cálculo los ángulos **LA** y **LB** (lecturas radiogoniométricas de las estaciones A y B de una señal emitida por Δ) se obtendría como salida la latitud y Longitud de Δ . Resolviéndose primeramente el triángulo **T-I** teniendo los valores de **c**, $\alpha(A-LA)$ y $\beta(B-LB)$. Una vez esto se calcularían los triángulos **T-II** y **T-III** obteniéndose finalmente la posición de Δ .

Para las fórmulas empleadas no se dan dobles soluciones, al ser todos los datos obtenidos con la función inversa arcocoseno. Siendo el recorrido de los ángulos entregados por esta de 0° a 180° , y los valores posibles para estos casos el mismo. Solo se da un caso particular que no tiene solución, cuando el buque estuviera en algún punto del círculo máximo que une las estaciones costeras. Para más precisión y resolver esta ambigüedad se plantea un sistema con al menos tres estaciones costeras.

Si se realizan las mismas operaciones con cuatro estaciones, estando Δ entre dos y dos, se obtendrían cuatros posibles puntos que formarían un cuadrilátero en el que habría que estudiar el error que se cometería al usar el centro de este como posición.

Si el sistema propuesto usara un número elevado de estaciones costeras (situadas sin obstáculos orográficos cara al mar) pensamos que la precisión alcanzada podría cumplir o quedar cerca de los mínimos impuestos por OMI para este tipo de sistemas en la Resolución A953(23) que se describe en la herramienta II.2.5.-.

II.2.2.- Fórmulas de la trigonometría esférica.

Las fórmulas empleadas para la resolución de triángulos esféricos son descritas en el apartado Aplicación Práctica (véase III.2.2.-), donde se expone su aplicación para la resolución del problema. Con estas fórmulas, mediante tres datos conocidos se obtienen los valores de los otros tres (tres lados esféricos y tres ángulos esféricos). Los valores del triángulo esférico para su resolución son referidos al vértice polar principal (polo Norte), por lo que se evalúan los datos de las entradas para ser referenciados a este punto y definir un triángulo esférico. Posteriormente se resuelve con las fórmulas fundamentales de trigonometría esférica. Conseguidos todos los valores del triángulo, son evaluados atendiendo a las componentes de los datos de las entradas para obtener las coordenadas del buque.

Los fundamentos de trigonometría esférica están obtenidos principalmente de: Trigonometría Esférica-Teoría y Problemas Resueltos de M^a Asunción Iglesias (Martín, 2004, pp. 164-170), Fundamentos de Navegación Marítima de (Itsaso & Gaztelu-Iturri, 2002), Trigonometría Esférica Fundamentos (Barrero Ripoll, et al., 2008) y Trigonometría Plana y Esférica de (Frank Ayres, 1987).

II.2.3.- Microsoft Excel.

En la asignatura Formación Investigadora de Máster citado anteriormente se imparten los conocimientos necesarios para manejar la hoja de cálculo para los fines propuestos en este TFM (Sánchez Díaz de la Campa, 2017).

II.2.4.- Flujogramas.

Con la aplicación de flujogramas (otra de las herramientas procedentes de los Contextos Científico Técnico impartidos en el Máster) se plasma y desglosa de una forma más clara el problema a resolver. Esto permite visualizar los pasos a seguir de forma ordenada hasta conseguir la integración de todos los cálculos en la hoja que realice las operaciones.

II.2.5.- Resolución A 953(23) (OMI, 2003).

*“Atendiendo a la Resolución A.953(23) adoptada el 5 de diciembre de 2003 por la OMI en la que expone la necesidad de establecer un sistema mundial de radionavegación, INVITA a los Gobiernos a que mantengan informada a la Organización del **desarrollo operacional** de cualquier sistema de radionavegación adecuado que se ajuste a dicho criterio y que la Organización podría examinar para su utilización por los buques en todo el mundo”.*

En esta resolución se establece que el sistema debe proporcionar información adecuada para determinar la situación dentro de su zona de cobertura y que el equipo receptor que han de llevar los buques para utilizar el sistema satisface las prescripciones pertinentes del Convenio SOLAS 1974, enmendado.

Dentro de esta resolución se marcan ciertos requisitos de funcionalidad y precisión para tres diferentes zonas de navegación (Anexo 1):

1. NAVEGACIÓN EN LAS ENTRADAS Y ACCESOS A PUERTOS Y EN LAS AGUAS COSTERAS CON UN VOLUMEN CONSIDERABLE DE TRÁFICO O UN ELEVADO GRADO DE RIESGO*
2. NAVEGACIÓN EN LAS ENTRADAS Y ACCESOS A PUERTOS Y EN LAS AGUAS COSTERAS CON UN VOLUMEN MENOR DE TRÁFICO O UN GRADO INFERIOR DE RIESGO*
3. NAVEGACIÓN EN AGUAS OCEÁNICAS.

Siendo este último caso al que se pretende aplicar el sistema propuesto. Realizando un estudio con la herramienta de cálculo desarrollada que permita una primera evaluación de la precisión alcanzada.

“4.1 Cuando se utilice un sistema de radionavegación para ayudar a los buques a navegar en aguas oceánicas, el sistema proporcionará información sobre la situación con un error no superior a 100 metros y con una probabilidad del 95%. Este grado de precisión es adecuado para la navegación en general y para suministrar información sobre la situación en el SMSSM”. (OMI, 2003).

Estos requisitos serán los que marquen los objetivos de precisión para el sistema propuesto. El presente trabajo no alcanza a evaluar la precisión del sistema propuesto, simplemente desarrolla unas herramientas informáticas que pudieran emplearse en el trabajo de campo asociado a dicha evaluación.

La OMI hace hincapié en no confiar plenamente en el posicionamiento y seguimiento de la derrota por estos medios. Exigiendo que se contrasten en todo momento con otros medios para comprobar la situación y rumbo a seguir.

Por muchos GPS que se lleven por duplicado, dependen de una sola fuente para su funcionamiento, los satélites. La OMI exige que varios de los sistemas usados abordo funcionen con base a fuentes independientes. Por eso no podemos delegar plenamente la navegación a un sistema basado en los satélites.

Como se expone en el trabajo, resoluciones de la OMI instan a los gobiernos que investiguen en el desarrollo de sistemas alternativos al GPS para el posicionamiento. Buscando un sistema independiente y complementario al de los satélites. Contrastada su precisión con los requisitos mínimos exigidos en esta disposición serán homologados e instalados en todos los buques.

II.3.- Metodología

La metodología está dividida en dos apartados; cómo resolver problemas de trigonometría esférica, y cómo integrar las operaciones para su resolución de forma automática usando una hoja de cálculo en Excel.

II.3.1.- Resolución de un problema de trigonometría esférica

II.3.1.1.- Convertir Datos-Entradas a Datos Esféricos.

En algunos casos, la práctica ha llevado a que se midan ángulos o lados de un triángulo esférico de forma diferente a como se asume en las fórmulas de la trigonometría esférica. Los sistemas de referencia y el sentido en el que se miden los ángulos en Navegación son diferentes a los empleados en trigonometría. Esta es la primera cuestión que debe revisarse.

II.3.1.2.- Identificar el caso

La resolución de triángulos esféricos se divide en casos, cuyos mecanismos de resolución se conocen. Se debe identificar el caso y la literatura al respecto nos aportará las fórmulas y la secuencia en la que deben usarse.

II.3.1.3.- Análisis de los casos particulares y de las dobles soluciones de cada fórmula.

Los casos particulares son aquellos para los que la fórmula trigonométrica no da solución. Una doble solución aparece cuando el resultado de una fórmula puede responder a más de una solución dentro del problema.

Se investigarán los casos particulares o dobles soluciones de cada fórmula. La investigación de los casos particulares o dobles soluciones da lugar a un flujograma. En este flujograma, se insertan las decisiones como preguntas incluidas dentro de un diamante de decisión.

Como ejemplo, se incluye a continuación la resolución de las dobles soluciones de la fórmula del Rumbo inicial (Sánchez Díaz de la Campa, 2017):

$$\text{Cotg } Ri = \frac{\text{tg } l' \cos l - \text{sen } l \cos \Delta L}{\text{sen } \Delta L}$$

Se observa que la entrada es el rumbo inicial en cuadrantales entregado por la fórmula (Ri_cdr). Seguidamente, atendiendo a los componentes conocidos del triángulo como la diferencia en longitud, se van identificando las decisiones a tomar hasta llegar al rumbo inicial que corresponde al triángulo del problema.

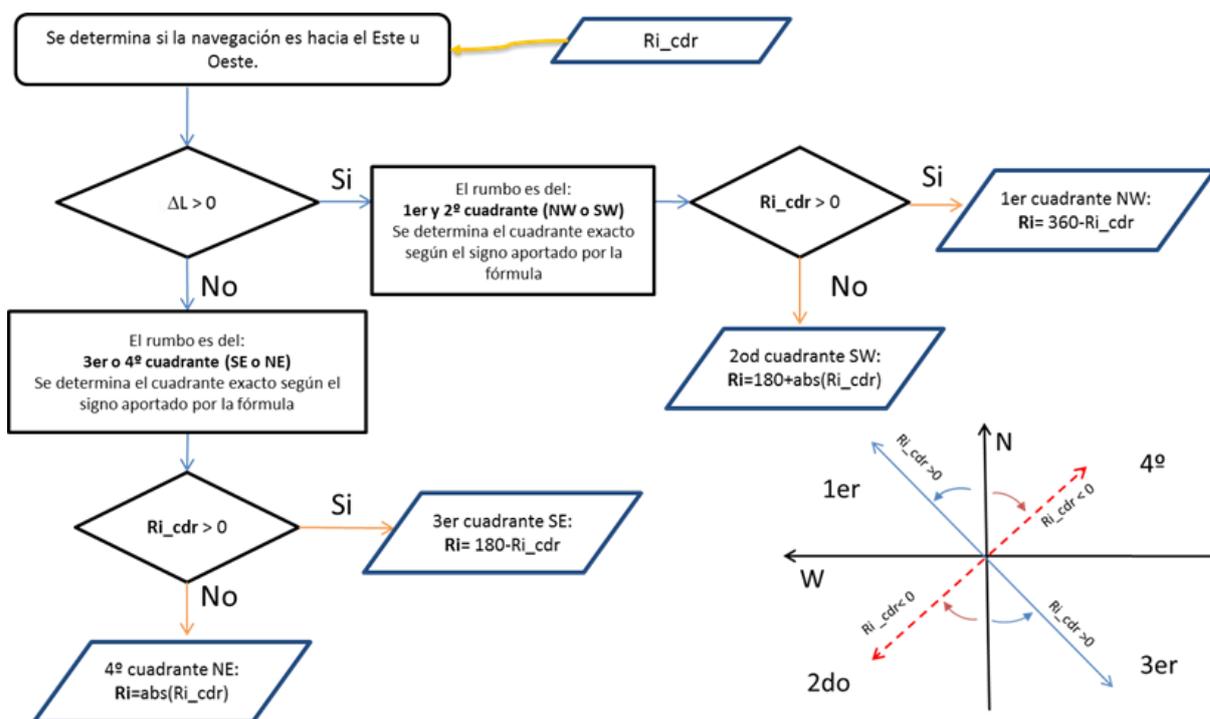


Figura 2: Extraída de (Sánchez Díaz de la Campa, 2017).

II.3.1.4.- Conversión a Longitud del ángulo en el polo y tratamiento general de las diferencias en longitud.

Las longitudes no son tenidas en cuenta hasta una vez resuelto el triángulo esférico. Para la resolución de este no tiene relevancia la orientación ni posición que tenga respecto al meridiano de Greenwich.

Obtenidos todos los datos del triángulo es cuando el ángulo \mathcal{C} o ángulo en el polo es tratado como un incremento en longitud ($\Delta\lambda$) respecto a la longitud conocida de la estación costera. Este incremento será sumado o restado a la longitud de la estación costera en función de la componente (signo) asignada. Determinando esto si la posición buscada está más al E u al W de la estación costera una cantidad de grados igual a \mathcal{C} .

El rango de valores **admisibles** de esta operación es de 0° a 180° , con signo o componente. El rango de valores **posibles** es de 0° a 360° . (Esta cuestión se aplica en III.2.4.-).

Cualquier diferencia en longitudes da lugar al mencionado problema. El rango de valores **posibles** de una diferencia de dos longitudes es de 0° a 360° , con signo (+W, -E). En cambio, el rango de valores **admisibles** es de 0° a 180° , con signo. Por ello, debe tenerse en cuenta el siguiente filtro a aplicar siempre que se calcule una diferencia de dos longitudes (Ministry of Defence (Navy), 1982, p. 553 a 558):

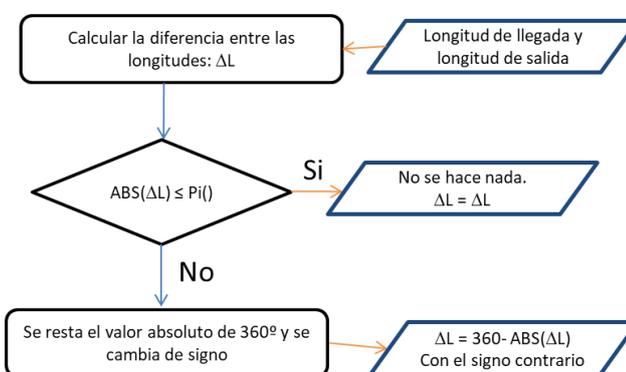


Figura 3: Extraída de (Sánchez Díaz de la Campa, 2017).

II.3.2.- Introducir un problema de trigonometría esférica en Excel.

II.3.2.1.- Transformar las entradas y las salidas

Los valores de las funciones trigonométricas y sus funciones inversas son realizados en Excel en radianes. Los valores de las entradas son convertidos a radianes para ser operados en Excel. Conseguidos los resultados de operar las fórmulas de trigonometría esférica (entregados por Excel en forma de radianes) se transforman sus valores para ser mostrados en grados y minutos sexagesimales.

II.3.2.2.- Comprobar los recorridos de las funciones trigonométricas inversas.

Los casos particulares y las dobles soluciones pueden depender del recorrido de las funciones trigonométricas inversas. Por ello, estos recorridos deben conocerse.

Por ejemplo, la fórmula $\cos D = \text{sen} l \text{sen} l' + \cos l \cos l' \cos(L' - L)$, entrega sus resultados con la función arco coseno. Si comprobamos el recorrido de esta función en Excel, resulta ser de 0 a 180° . Valores que coincidan con los valores posibles de la distancia

ortodrómica, con lo que nos aseguramos de que esta fórmula no origina dobles soluciones.

Para revisar los recorridos de las funciones trigonométricas se recomienda colocar en una columna ángulos entre -360° y 360° separados, por ejemplo, de diez en diez grados. En la columna siguiente se calcula la razón trigonométrica y, por último, en una tercera columna se aplica la función trigonométrica inversa. En esta última columna resultará sencillo observar que valores abarca el recorrido buscado.

II.3.2.3.- Dedicar una hoja a la entrada y salida de datos.

Dentro de las hipótesis de resultado se incluyó la cuestión de que la entrada y salida de datos debían agruparse. Para ello se destina una hoja para la entrada y salida de datos, mientras que los cálculos se realizarán en otras hojas que posteriormente se ocultarán.

II.3.2.4.- Realizar el tratamiento informático de los flujogramas.

Los apartados II.3.1.3.- y II.3.1.4.- de esta metodología han dado lugar a flujogramas. En este apartado se transforman dichos flujogramas en fórmulas de Excel.

Los diamantes de decisión de los flujogramas deben sustituirse por funciones "SI". En el ejemplo siguiente se observa como el flujograma se transforma en una función SI. La diferencia en longitudes se encuentra en la celda E8.

La pregunta del diamante de decisión se convierte en la condición de la función SI.

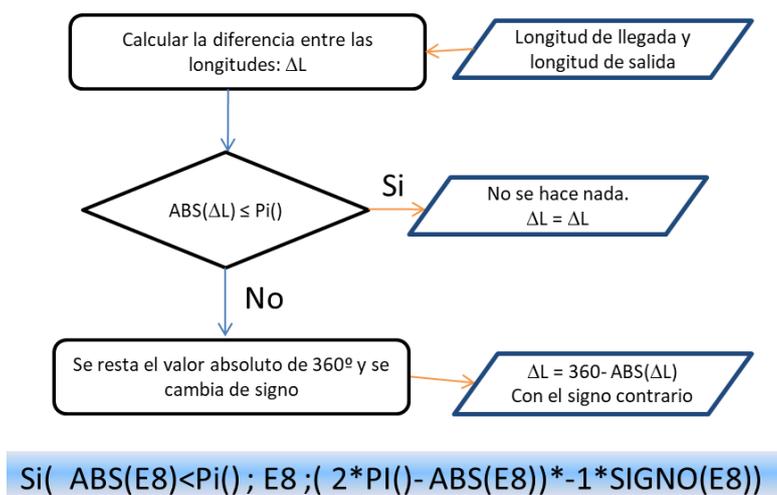


Figura 4: Extraída de (Sánchez Díaz de la Campa, 2017).

En general, se parte de un flujograma con diamantes de decisión. Seguidamente, se transforman los diamantes de decisión en funciones SI anidadas tal cómo se ve en la imagen.

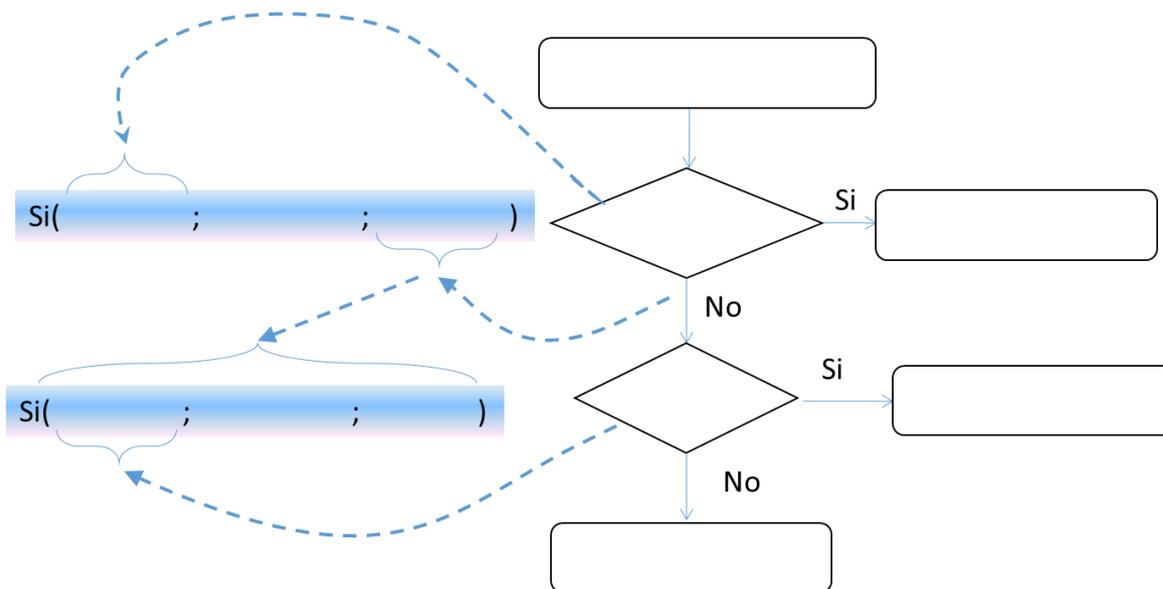


Figura 5: Extraída de (Sánchez Díaz de la Campa, 2017).

Las preguntas de los diamantes de decisión se convierten en condiciones de la función SI.

III.- APLICACIÓN PRÁCTICA

III.1.- Introducción

En el capítulo de Aplicación Práctica se aplicará la metodología para elaborar una hoja de cálculo que realice las operaciones que resuelvan el siguiente caso:

Conociendo las coordenadas de una estación costera y las demoras del círculo máximo que une a la costera con la posición del buque, la hoja entrega la posición de este.

Un segundo caso (Hoja de cálculo “DosEstaciones”) ha sido elaborado siguiendo la misma metodología. En esta hoja se operan triángulos esféricos introduciendo en Excel las fórmulas para resolver el planteamiento detallado en II.2.1.-. Las dobles soluciones y casos particulares no se dan en la resolución de este caso, por lo que se ha realizado la Aplicación Práctica para el caso que requiere más tratamiento.

Ambos casos tienen como variables independientes las lecturas de dos radiogoniómetros. En el caso de “UnaEstación”, se emplean las demoras del buque y de una estación costera. Para “DosEstaciones”, el buque procesa las demoras que reciben los radiogoniómetros de dos estaciones costeras. Estas demoras son recibidas a bordo, y tras realizar las operaciones planteadas entrega la posición del buque.

En sucesivos trabajos, se pretende analizar los datos de campo de ambos sistemas para analizar el error cometido y evaluar la posibilidad de minimizarlos.

A continuación, se aplica la metodología diseñada en este trabajo al caso de trigonometría esférica en el que se emplean las demoras del buque y de una estación costera para situar el buque.

III.2.- Resolución de un problema de trigonometría esférica.

III.2.1.- Convertir Datos-Entradas a Datos Esféricos.

Ángulos Esféricos

Las lecturas radiogoniométricas son entregadas como demoras, contadas desde el Norte en sentido horario de 000° a 360° . Estas demoras forman ángulos del triángulo esférico a resolver. Los ángulos y lados esféricos no pueden tener más de 180° .

Para abordar esta cuestión se establece que las demoras:

1. De 0° a 180° han recibido la señal desde el Este. Conservan su valor y se le asigna componente “E” (-) desde donde proviene la señal, o donde se encuentra la estación transmisora respecto a la receptora.
2. Para $>180^{\circ}$, que la señal proviene del Oeste. El ángulo esférico que consideramos para la resolución es contado desde el polo Norte en sentido antihorario hasta la demora. En este caso, el ángulo de la demora es restado de 360 y se le asignará componente “W” (+).

Con estas asignaciones respetamos los convenios de signos respetados por todas las ciencias. Los marinos contamos los rumbos o demoras en el sentido que es considerado como sentido de giro negativo por el resto de ciencias.

Lados Esféricos

En Navegación, la latitud es contada desde el ecuador hacia los polos sobre el círculo máximo que los une y pasa por el punto a situar. La medida que se requiere para resolver el triángulo es la medida desde el vértice polar principal (Norte) hasta el punto. Esta medida es la colatitud o ángulo complementario de la latitud. Para obtenerla restaremos de 90 la latitud. Siendo las latitudes hacia el Norte positivas y negativas hacia el Sur. Dando esto la distancia del punto hasta el vértice polar, siendo esto el lado esférico del triángulo.

III.2.2.- Identificar el caso.

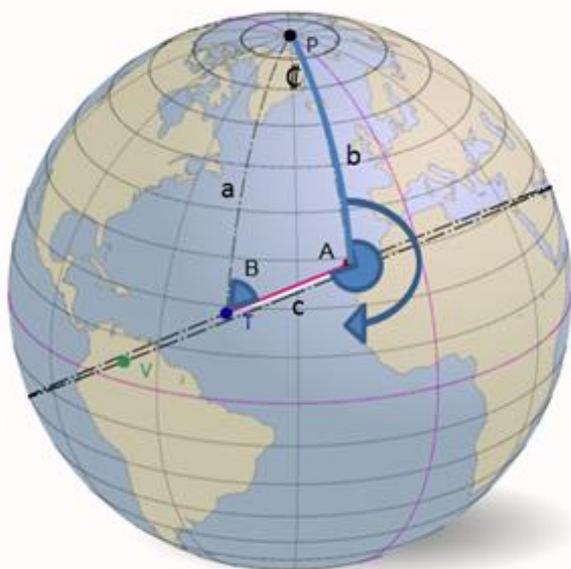
El caso al que nos enfrentamos ha sido documentado en “Trigonometría Esférica. Teoría y problemas resueltos” de María Asunción Iglesias (Martín, 2004) y “Trigonometría Esférica Fundamentos” (Barrero Ripoll, et al., 2008). Las fórmulas que se deben emplear y la descripción del caso es como sigue:

Teorema del seno

Conocidos la posición de la estación costera (latitud, Longitud) y los ángulos de recepción de los radiogoniómetros (demoras de las señales¹). Se calcula el lado del triángulo esférico que corresponde a la colatitud del buque. Para ello, se emplea el teorema del seno, al tener los valores de dos ángulos y un lado frente a uno de los ángulos (Martín, 2004):

¹ Señal emitida por la estación y recibida en el buque; y señal emitida por el buque y recibida en la estación.

$$\frac{\text{sen } a}{\text{sen } A} = \frac{\text{sen } b}{\text{sen } B} = \frac{\text{sen } c}{\text{sen } C} \quad (\text{dos posibles soluciones: } \alpha \text{ y } 180^\circ - \alpha)$$



En la imagen se muestran los datos del triángulo a resolver, **A** \hat{C} **B**. Se conocen los ángulos **A**, **B** y el lado **b**. Los ángulos en los vértices **A** y **B** son obtenidos de las demoras radiogoniométricas, representadas con los círculos parciales de color azul. El tercer dato conocido es el lado **b**, arco de círculo máximo que va de **A** a **P**, correspondiente a la colatitud de la estación costera situada en el vértice **A** (véase III.2.1.-).

Figura 6: Extraída de Navigation Calculator (Nautical, DBG, 2017).

Analogías de Neper

Una vez tratadas las posibles dobles soluciones que se pueden obtener mediante el teorema del seno se procede a determinar los datos que faltan para resolver completamente el triángulo esférico. Para ello, teniendo entonces dos lados y los ángulos frente a estos se obtienen el resto de los datos aplicando las Analogías de Neper para la resolución.

En la mayoría de los casos, siendo el resto considerados casos particulares, el ángulo **A** es distinto de **B**, por lo tanto, el lado **b** será distinto al lado **a** (obtenido por el teorema del seno). Para determinar el ángulo **C** y lado **c** se emplea la segunda Analogía de Neper (Martín, 2004).

$$A \# B \Leftrightarrow a \# b$$

$$C = 2 \arctg \frac{\cos \frac{a-b}{2}}{\operatorname{tg} \frac{A+B}{2} \cos \frac{a+b}{2}} \quad c = 2 \arctg \frac{\cos \frac{A-B}{2} \operatorname{tg} \frac{a+b}{2}}{\cos \frac{A+B}{2}}$$

III.2.3.- Análisis de los casos particulares y de las dobles soluciones de cada fórmula.

Casos particulares y dobles soluciones del [teorema del seno](#).

Una doble solución aparece cuando el resultado de una fórmula puede responder a más de una solución dentro del problema.

Obtenido el valor del seno para el lado a determinar se evaluará si este valor corresponde al ángulo calculado, a su suplementario o son posibles las dos soluciones.

Una de las soluciones se puede descartar aplicando que, al ángulo mayor corresponde (enfrente) el lado mayor. Siendo comparados con el otro lado y ángulo que introducimos en el teorema del seno.

Si de los dos ángulos conocidos uno es mayor que el otro, pongamos como ejemplo $A > B$ y el lado conocido es el a , entonces a puede ser mayor que el lado b y menor que $180-b$, teniendo así una sola solución (b). O puede ser mayor que $180-b$ teniendo entonces dos posibles soluciones (b y $180-b$) (Martín, 2004). Si las dos soluciones son posibles se realizan las operaciones con ambos valores, obteniendo en la resolución de los siguientes datos algo que permita descartar una. Si las dos soluciones son matemáticamente posibles, una la descartaremos observando que la posición entregada está en el otro hemisferio al esperado y cientos de millas de la posición estimada.

En los casos que las soluciones del lado obtenido y su suplementario son válidas, se operan de igual forma los dos valores. Resolviéndose dos triángulos de distintas dimensiones. Matemáticamente estos dos triángulos son correctos, pero si están aplicados a un problema concreto una de las soluciones no tiene sentido.

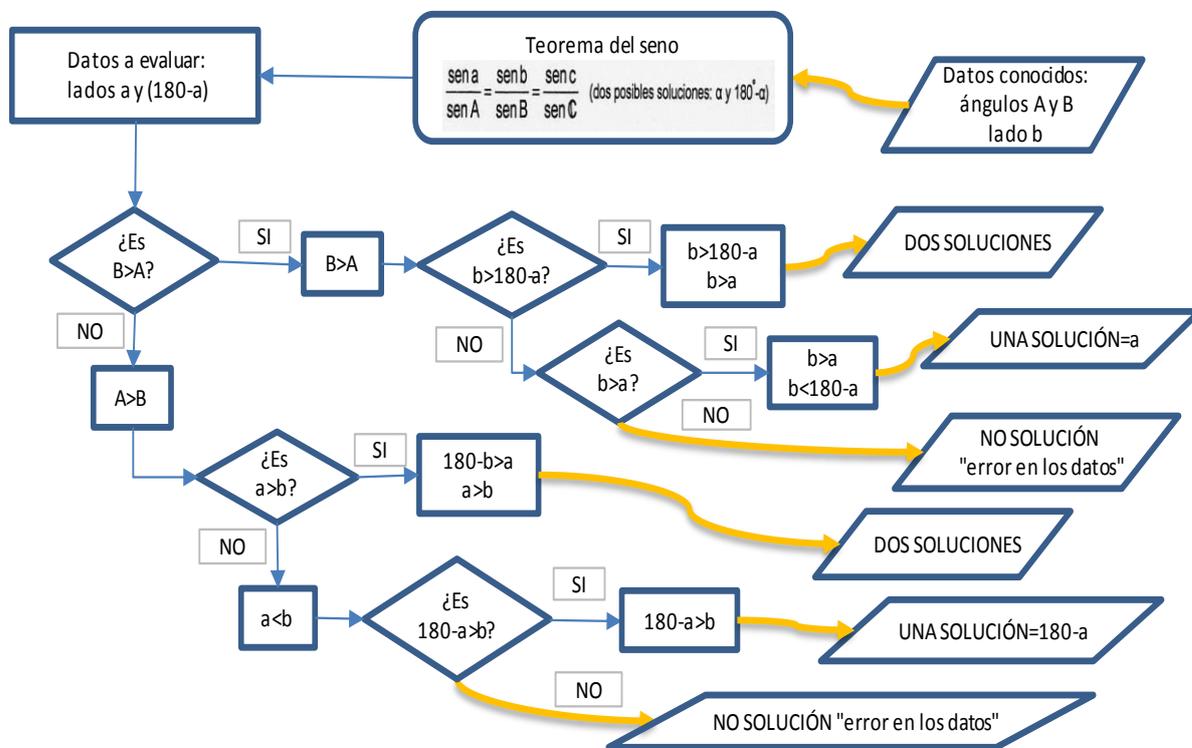


Figura 7: Elaboración propia.

Casos particulares y dobles soluciones de las analogías de Neper.

Para el planteamiento propuesto, el ángulo C obtenido no será mayor de 180° . Los valores de tangentes negativas corresponden en el problema a ángulos entre 90° y 180° , pero la función trigonométrica inversa nos devuelve para estos valores ángulos de -90° a 00° (Véase el análisis de los recorridos III.3.2.-). Esto podría dar lugar a dobles soluciones o errores, pero no es así tal como se explica a continuación.

Para obtener el valor de ángulo C se emplea la segunda Analogía de Neper (véase III.2.2.-). Esta fórmula opera de forma que $C=2*ATAN(\text{valor})$, y este no será mayor que 180° por las condiciones del problema. $ATAN(\text{valor})$ no será mayor de 90° . Por lo que el dominio de los valores entregados por esta fórmula para el caso planteado es de 0° a 180° .

En los supuestos en los que las lecturas radiogonimétricas entregasen valores iguales, y estos fuesen distintos de 90° , los lados frente a estos ángulos indudablemente han de ser iguales. Esto es contemplado y calculado con la siguiente Analogía de Neper.

$$a=b \neq 90^{\circ} \Leftrightarrow A=B \neq 90^{\circ}$$

$$C = 2 \arctg\left(\frac{1}{\operatorname{tg} A \cos a}\right) \quad c = 2 \arctg\left(\frac{\operatorname{tg} a}{\cos A}\right)$$

Cuando $A=B=90^{\circ}$, siendo entonces $a=b=90^{\circ}$, matemáticamente existen infinitas soluciones, no pudiendo ser resuelto los valores para el ángulo ϕ y el lado c . Este caso solo se puede dar en el supuesto que la estación costera se encuentre justo en algún punto del ecuador, y el buque coincida en otro punto sobre el mismo ecuador. Esta posibilidad es descartada al no ser considerada ninguna estación con latitud 00° .

III.2.4.- Conversión a Longitud del ángulo en el polo y tratamiento general de las diferencias en longitud.

Resueltos todos los datos del triángulo esférico se procede a convertir los valores a coordenadas. El ángulo ϕ o ángulo en el polo es el que determina la longitud final del buque. Siendo aplicado este como un incremento en longitud sobre una de las estaciones. En este caso el incremento tiene el signo de la componente asignada en función de donde la estación costera recibe la señal (véase III.2.1.-). Esto determina si el incremento en longitud es hacia el Este o el Oeste de la estación costera.

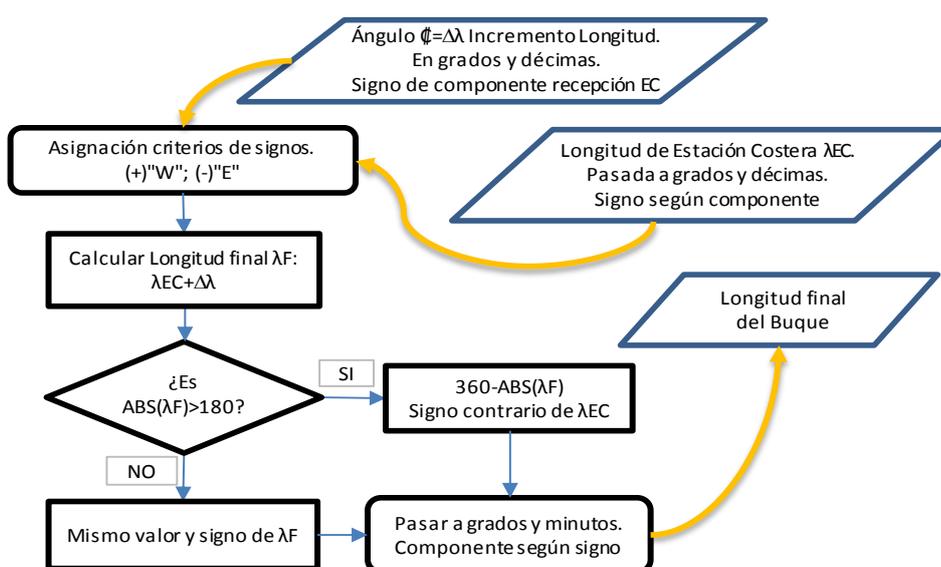


Figura 8: Elaboración Propia.

Este incremento en longitud es sumado algebraicamente a la longitud de la estación, ambas con el signo de la componente que tienen asignado. De igual forma que para la diferencia en longitud, se procede a determinar el signo y valor final de esta aplicando que no puede ser mayor de 180° (véase II.3.1.4.-).

III.3.- Introducir un problema de trigonometría esférica en Excel

La introducción de los cálculos en Excel que se describe a continuación es realizada sobre el caso que determina la posición con una estación (véase II.3.1.-).

III.3.1.- Transformar las entradas y las salidas

Los valores de las funciones trigonométricas y sus funciones inversas son realizados en Excel en radianes. Los valores de las entradas son convertidos a radianes para ser operados en Excel. Conseguidos los resultados de operar las fórmulas de trigonometría esférica (entregados por Excel en forma de radianes) se transforman sus valores para ser mostrados en grados y minutos sexagesimales.

Transformar las entradas

El primer paso es la conversión de los grados y minutos a grados y décimas de grado. Posteriormente son convertidos a radianes para ser operados con las fórmulas de trigonometría esférica insertadas en la hoja "Operaciones".

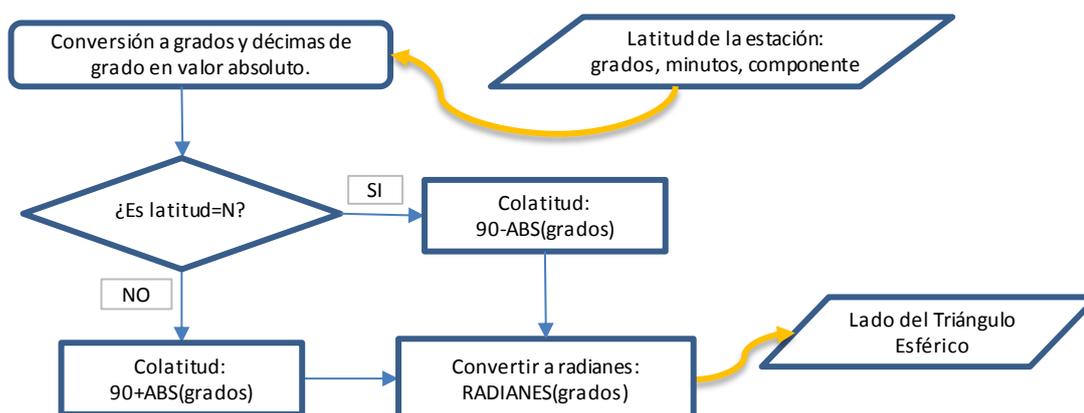


Figura 9: Elaboración propia.

$$=RADIANES(ABS(C12)+ABS(D12)/60)$$

Esta expresión transforma a radianes la entrada en grados(C12) y minutos(D12) sexagesimales. El empleo de los valores absolutos permite evitar que se produzcan errores por la presencia de signos en los grados o en los minutos.

El signo de las coordenadas es asignado por la letra de su componente (N, S, E, W), que es introducido mediante un menú desplegable insertado para cada celda. Para la conversión de latitud a colatitud (ángulo complementario de la latitud) se introduce el siguiente condicional, obteniendo así el valor del lado conocido del triángulo a resolver.

$$=SI(E7="N";90-ABS(F7);ABS(F7)+90)$$

Los valores de las demoras aportadas por el radiogoniómetro van de 000° a 360°, contadas desde el meridiano superior del lugar en sentido horario con cero en la dirección Norte. Los ángulos esféricos pueden tomar un valor máximo de 180°. Para el triángulo a resolver estos ángulos son medidos desde el meridiano superior de cada estación de 000° a 180° hacia el Este u Oeste. Por esto, un ángulo mayor de 180 es restado de 360 y se le asigna una componente "W". Las demoras menores de 180 conservan su valor y se les asigna componente "E". Estas componentes indican la dirección desde donde procede la señal, y su valor, el ángulo esférico usado para la resolución.

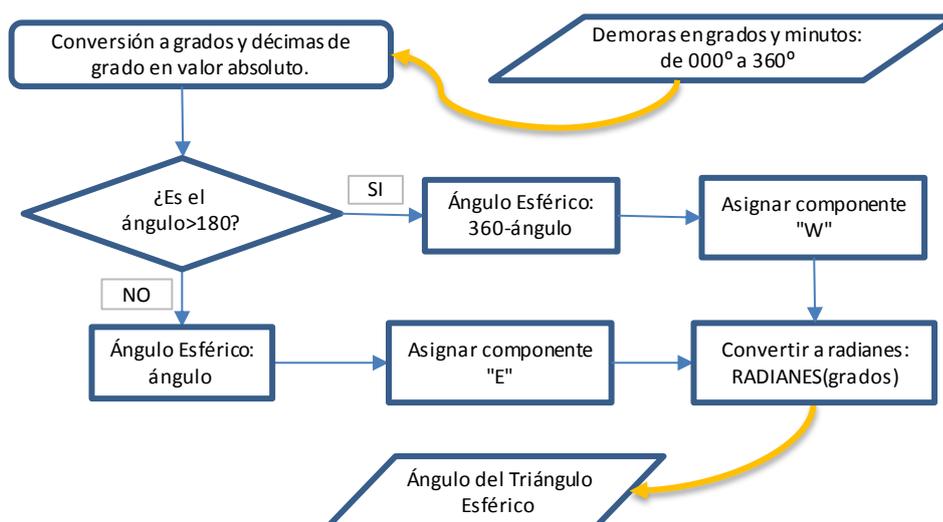


Figura 10: Elaboración propia.

$$=SI(F12<180;F12;360-F12)$$

Introduciendo este condicional obtenemos el ángulo contado desde el polo Norte hacia el Este u Oeste. El valor de la componente se asigna mediante:

`=SI(F12<180;"E";"W")`

Realizadas estas conversiones y asignaciones de las componentes que determinan el signo, tenemos los valores del triángulo esférico para ser resuelto. Una vez resuelto, los valores obtenidos son sumados o restados atendiendo al criterio asignado a las componentes.

Transformar las salidas

Realizadas las operaciones, los valores obtenidos en radianes se convierten para ser mostrados en la hoja principal "Datos-Resultados" como latitud y longitud del buque. La conversión inversa se realiza para mostrar grados, minutos y componente de estas coordenadas.

Para la conversión de radianes a grados se usa la función de Excel:

`=GRADOS(D12)`

Donde la casilla (D12) es el resultado obtenido en radianes. A la casilla de grados en el resultado se vincula este valor separándolo de su parte decimal que posteriormente es convertido a minutos. Con la función truncar, la casilla toma el valor entero del dato.

`=TRUNCAR(Operaciones!D12)`

Restando del valor total el valor entero tenemos las décimas de grado, pasadas a minutos multiplicando por 60.

`=(Operaciones!D12-TRUNCAR(Operaciones!D12))*60`

III.3.2.- Comprobar los recorridos de las funciones trigonométricas inversas.

En la imagen siguiente se reproduce la parte de la hoja de cálculo donde se comprueba el recorrido de las funciones trigonométricas de 0° a 180°.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2		Ángulo	COS	SEN	TG	ACOS	GRADOScos	ASEN	GRADOsen	ATAN	GRADotg
18		210	-0,8660254	-0,5	0,577350269	2,61799388	150	-0,52359878	-30	0,523598776	30
19		200	-0,93969262	-0,34202014	0,363970234	2,7925268	160	-0,34906585	-20	0,34906585	20
20		190	-0,98480775	-0,17364818	0,176326981	2,96705973	170	-0,17453293	-10	0,174532925	10
21		180	-1	1,22515E-16	-1,2251E-16	3,14159265	180	1,22515E-16	7,01958E-15	-1,2251E-16	-7,0196E-15
22		170	-0,98480775	0,173648178	-0,17632698	2,96705973	170	0,174532925	10	-0,17453293	-10
23		160	-0,93969262	0,342020143	-0,36397023	2,7925268	160	0,34906585	20	-0,34906585	-20
24		150	-0,8660254	0,5	-0,57735027	2,61799388	150	0,523598776	30	-0,52359878	-30
25		140	-0,76604444	0,64278761	-0,83909963	2,44346095	140	0,698131701	40	-0,6981317	-40
26		130	-0,64278761	0,766044443	-1,19175359	2,26892803	130	0,872664626	50	-0,87266463	-50
27		120	-0,5	0,866025404	-1,73205081	2,0943951	120	1,047197551	60	-1,04719755	-60
28		110	-0,34202014	0,939692621	-2,74747742	1,91986218	110	1,221730476	70	-1,22173048	-70
29		100	-0,17364818	0,984807753	-5,67128182	1,74532925	100	1,396263402	80	-1,3962634	-80
30		90	6,1257E-17	1	1,63246E+16	1,57079633	90	1,570796327	90	1,570796327	90
31		80	0,17364818	0,984807753	5,67128182	1,3962634	80	1,396263402	80	1,396263402	80
32		70	0,34202014	0,939692621	2,747477419	1,22173048	70	1,221730476	70	1,221730476	70
33		60	0,5	0,866025404	1,732050808	1,04719755	60	1,047197551	60	1,047197551	60
34		50	0,64278761	0,766044443	1,191753593	0,87266463	50	0,872664626	50	0,872664626	50
35		40	0,76604444	0,64278761	0,839099631	0,6981317	40	0,698131701	40	0,698131701	40
36		30	0,8660254	0,5	0,577350269	0,52359878	30	0,523598776	30	0,523598776	30
37		20	0,93969262	0,342020143	0,363970234	0,34906585	20	0,34906585	20	0,34906585	20
38		10	0,98480775	0,173648178	0,176326981	0,17453293	10	0,174532925	10	0,174532925	10
39		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
40		-10	0,98480775	-0,17364818	-0,17632698	0,17453293	10	-0,17453293	-10	-0,17453293	-10
41		-20	0,93969262	-0,34202014	-0,36397023	0,34906585	20	-0,34906585	-20	-0,34906585	-20
42		-30	0,8660254	-0,5	-0,57735027	0,52359878	30	-0,52359878	-30	-0,52359878	-30

Figura 11: Elaboración propia.

Para las fórmulas trigonométricas empleadas se debe atender a los recorridos de las funciones trigonométricas del seno y de la tangente, al ser estas las que nos devuelven el valor del dato calculado mediante sus funciones inversas.

Función ASENO (Arcoseno)

El ángulo devuelto por la función arcoseno (ASEN) toma valores de -90° a 90° . Los ángulos y lados de los triángulos esféricos están limitados de 0° a 180° . Los senos de estos valores son positivos. El recorrido de la función ASEN queda limitado de 0° a 90° , dado que este es el recorrido entregado por la función ASEN cuando su argumento es positivo y menor de 180° .

El valor del seno para un ángulo y su suplementario es el mismo. Para el caso a resolver, los valores de ángulos mayores de 180° son descartados, por lo que valores de ángulos negativos no son contemplados. Tras evaluar si el verdadero valor es α , $180^\circ-\alpha$ o las dos, la función seno no presenta más problema.

Función ATAN (Arcotangente)

Los posibles valores que se obtienen van desde el -90° al 90° . Para los valores del 00° al 90° no hay problema, los valores para este rango de ángulos coincide con valores del problema. Para los valores de 90 a 180 la función ATAN asigna -90° a 00° respectivamente, como se desprende de la hoja de recorridos. Con esto en cuenta, cuando la función ATAN entregue un valor negativo, restando a 180 el valor absoluto del ángulo entregado obtenemos el ángulo o lado esférico buscado.

Función ACOS (Arcocoseno)

Como se explicó anteriormente (véase II.3.2.2.-) la función ACOS nos devuelve valores comprendidos entre 0° y 180° , formando esto el dominio de los valores posibles. En los casos a resolver, los valores posibles están entre 0° y 180° , no dando esta función inversa ninguna doble solución.

III.3.3.- Dedicar una hoja a la entrada y salida de datos

En la imagen siguiente se muestra la hoja destinada a la introducción de datos. En la parte inferior de esta se muestran los resultados tras ser operadas las entradas y convertidos los valores a latitud y longitud de buque (estación móvil).

En las casillas sombreadas en azul son introducidos en grados y minutos los valores de las coordenadas de la estación costera y las demoras radiogoniométricas (señal emitida por la estación y recibida en el buque y señal emitida por el buque y recibida en la estación).

DATOS DE ENTRADA

Conocidos estos tres datos del triángulo esférico se resolverá y determinará la posición del Buque.

POSICIÓN DE LA ESTACIÓN			
Grados	Minutos	Signo	
Latitud	20	30	N
Longitud	5	30	W

Lado Esférico (b): 69,5

DEMORA GONIO ESTACIÓN			
Grados	Minutos	Radianes	Ángulo Esférico (A)
	290	5,077163	1,206023 W
			69,10

DEMORA GONIO BUQUE			
Grados	Minutos	Radianes	Ángulo Esférico (B)
	69	1,204277	1,204277 E
			69

DATOS DE SALIDA

POSICIÓN DEL BUQUE(1)				POSICIÓN DEL BUQUE(2)			
Grados	Minutos	Signo		Grados	Minutos	Signo	
Latitud	20	23,83909	N	Latitud	20	23,83909	S
Longitud	100	44,2923	W	Longitud	174	47,17383	E

DOS POSIBLES SOLUCIONES MATEMÁTICAS, DESCARTAR CON LA ESTIMADA

Autor: El lado del triángulo esférico a resolver es contado desde el vértice del ángulo en el polo. Una vez pasada la latitud a grados será restada algebraicamente de 90° asignándose el signo de la latitud mediante condición sobre la letra (componente) de esta.

Autor: Las demoras de recepción son introducidas según el rumbo circular (de 0° a 360°) que entregan los radiogoniómetros.

Autor: Se obtiene el ángulo esférico del triángulo a resolver. Pasado de 180° , el ángulo de recepción de la señal es contado desde el meridiano superior en sentido antihorario (en este caso el rumbo de recepción tendrá componente W). Se determinará, una vez resuelto el triángulo, la λ del Buque (B).

Autor: Indica la componente "E" "W" de recepción de la señal. Determinando la dimensión del ángulo en el triángulo esférico a resolver. Resuelto, se determina la λ en función de si recibió por el "E" u "W". La obtención de la latitud es independiente de esto.

Autor: Para el caso de dos posibles soluciones, con saber en que hemisferio nos encontramos basta para descartar una de ellas, al quedar la otra bastante alejada de ser posible.

Autor: En estas casillas aparecerá la posición del buque en el caso particular de que las lecturas de los radiogoniómetros entreguen para la resolución del triángulo esférico ángulos iguales y distintos a 90° . Ya que si $A=B=90^\circ$, entonces $a=b=90^\circ$ y existirán infinitas soluciones para este supuesto. El cual no sucederá al no estar ninguna de las estaciones usadas en el ecuador.

Figura 12: Elaboración propia.

En la imagen se observa la zona de entrada salida de datos. Esta hoja es la única visible. La entrada de datos es inmune a los signos que se introduzcan en las celdas de los grados y los minutos. El signo es controlado por la letra. La letra se escoge mediante un menú desplegable.

III.3.4.- Realizar el tratamiento informático de los flujogramas.

Tratamiento de las dobles soluciones.

Tras aplicar el teorema del seno, al tener como datos dos ángulos y un lado frente a uno de ellos, obtenemos el valor de esta razón trigonométrica para el lado frente al otro ángulo. Al aplicar la función arcoseno (ASENO) al valor del seno, devuelve el ángulo en radianes. Atendiendo a la tabla de recorridos vemos que los valores de la función ASENO van de 00° a 90° . Sin embargo, el rango de soluciones va de 0° a 180° . Por ello, siempre que se obtenga un ángulo desde la función seno se debe contrastar cuál de las dos soluciones es la correcta, α ó $(180-\alpha)$.

En la hoja de cálculo se integran las operaciones para las dos soluciones posibles. Realizando los cálculos para determinar el resto de los datos para ambos triángulos. Verificando cuál de los dos resultados es matemáticamente correcto empleando lo descrito en III.2.3.-. En la casilla “verificación”, dentro de la hoja “Operaciones”, se inserta el siguiente condicional que evalúa cual de las dos soluciones es correcta. Como se expuso anteriormente, si las dos soluciones son matemáticamente posibles, una de ellas se puede descartar por no tener lógica su resultado. Si son posibles matemáticamente las dos, en la casilla verificación aparece el texto “DOS SOL”, esto se vincula con otro condicional a la hoja “Datos-Resultado” para que se muestre de forma resaltada que una de las soluciones no se pudo descartar matemáticamente.

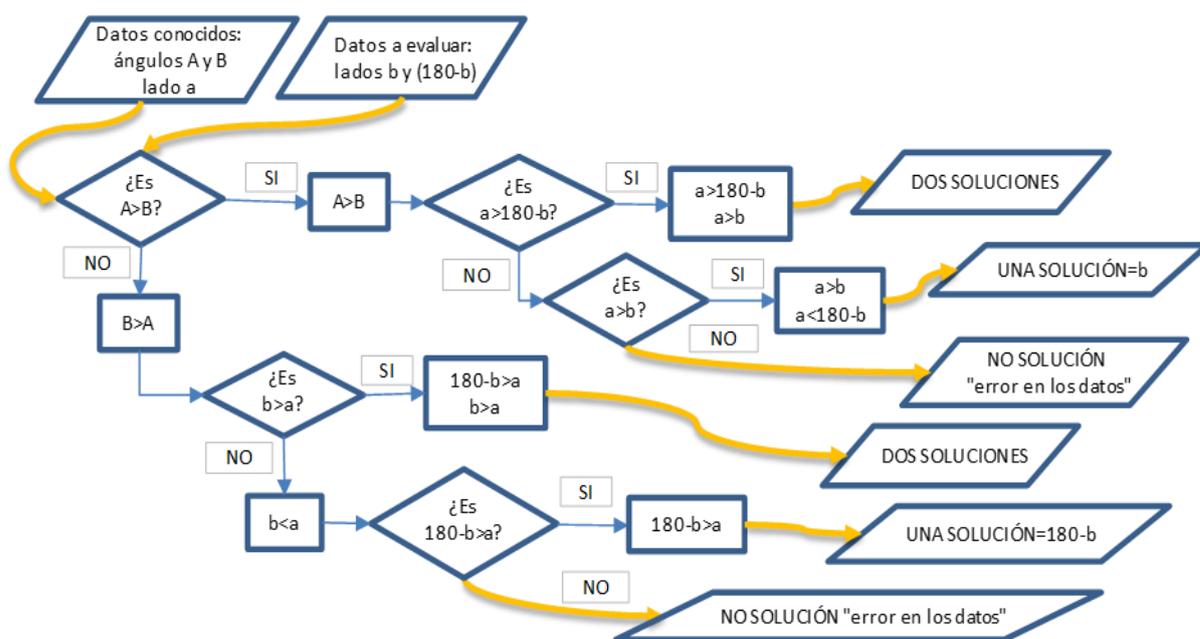


Figura 13: Elaboración propia.

$VERIFICACIÓN=SI(A>B;SI(a>(180-b);"DOS SOL";SI(a>b;"UNA SOL=b";"NO SOL");SI(b>a;"DOS SOL";SI((180-b)>a;"UNA SOL=180-b";"NO SOL")))$

En la casilla “verificación” se condicionan los resultados a mostrar en la hoja principal “Datos-Resultado” tras evaluar una solución conforme.

Cuando ninguna solución se pueda calcular, en la casilla bajo el resultado final aparece el texto “REVISAR DATOS, ALGO ERRONEO”. Todos los supuestos han sido contemplados, por lo que si ninguna solución puede ser calculada es debido a algún error al introducir los datos.

Los posibles resultados tienen aplicado un formato condicional que sombrea de negro la solución descartada matemáticamente, impidiendo su visualización cuando solo una de las soluciones es posible, mostrándose solo la correcta.

Tratamiento del caso particular. $a=b\#90^\circ \Leftrightarrow A=B\#90^\circ$.

Obtenido el lado con el teorema del seno y evaluadas las soluciones posibles se procede a calcular el ángulo ϕ empleando las Analogías de Neper (véase III.2.2.-). Estas operaciones se realizan para los dos resultados posibles (α y $(180-\alpha)$), descartándose una de ellas si matemáticamente no es correcta. De igual forma son realizadas las operaciones para los supuestos donde se cumplan este caso particular. Siendo mostrada esta solución alternativa cuando se cumpla el condicional de que las lecturas de las demoras entreguen ángulos esféricos iguales al triángulo a resolver. En este caso, los resultados de ser operados los datos con las fórmulas adecuadas para estos casos particulares (véase III.2.3.-) serán los que se muestren.

En el raro supuesto que esto suceda, la solución aparece en espacio sombreado al final de la hoja “Datos-Resultado”. Si esto no ocurre se ha introducido un condicional para que no se muestre nada hasta que se dé el caso:

$=SI(A=B;Q2;"")$

Lo que se ponga entre “comillas” aparece como texto en la casilla. Al no entrecomillar nada la casilla queda vacía si no se cumple la condición.

Para estos casos particulares, del teorema del seno solo es válida una solución.

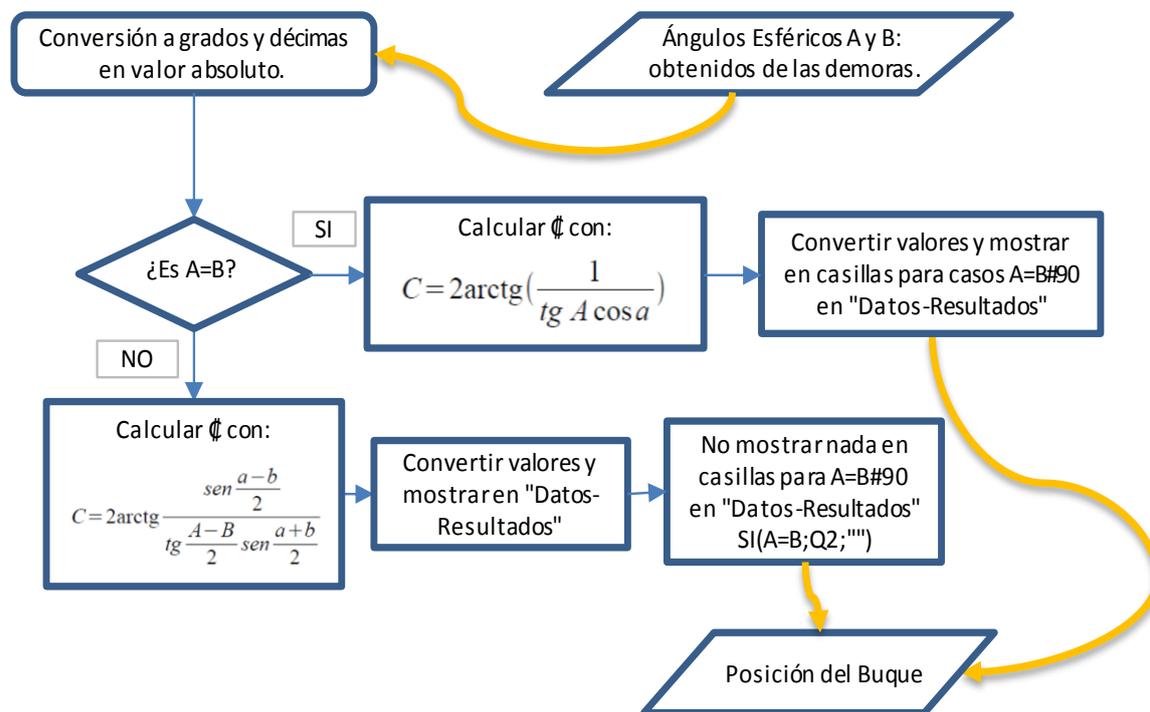


Figura 14: Elaboración propia.

Resuelto el triángulo evaluar solución final.

Una vez obtenidos todos los valores del triángulo esférico se determina el resultado final, la latitud y longitud del buque. Estos son mostrados en la hoja “Datos-Resultados” en valores de grados y minutos sexagesimales seguidos de la componente. Los radianes entregados por las fórmulas son convertidos a grados como se expuso anteriormente (véase III.3.1.-). Estos valores son pasados a coordenadas, atendiendo a los valores y componentes de las entradas.

Determinar latitud

Con el dato resultante de aplicar el teorema del seno se obtiene el valor del lado **a** del triángulo a resolver. Este lado **a**, como muestra la figura, es el valor de la colatitud del punto o vértice **B**, en este caso la colatitud del buque.

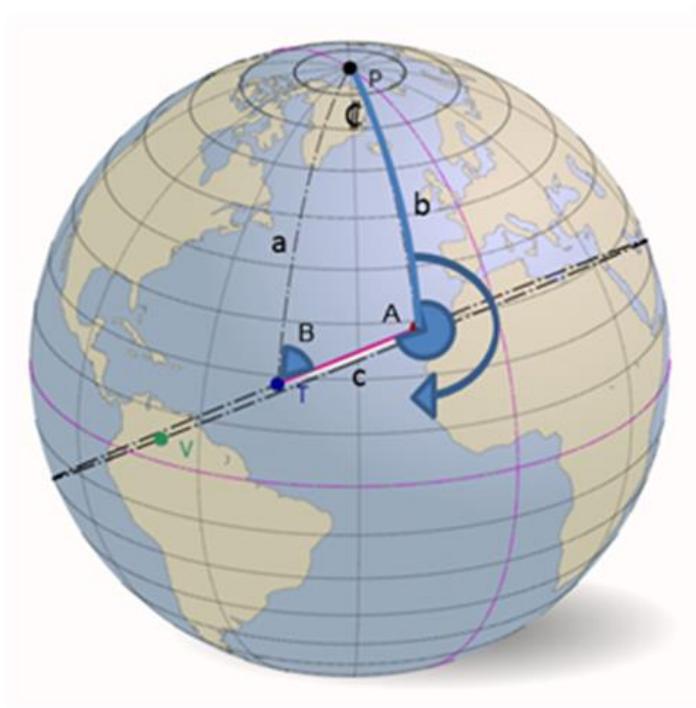


Figura 6: Extraída de Navigation Calculator (Nautical, DBG, 2017).

La operación inversa realizada para convertir la latitud a colatitud, se realiza con el valor del arco de meridiano obtenido para referenciarlo al ecuador, hacia el Norte o hacia el Sur.

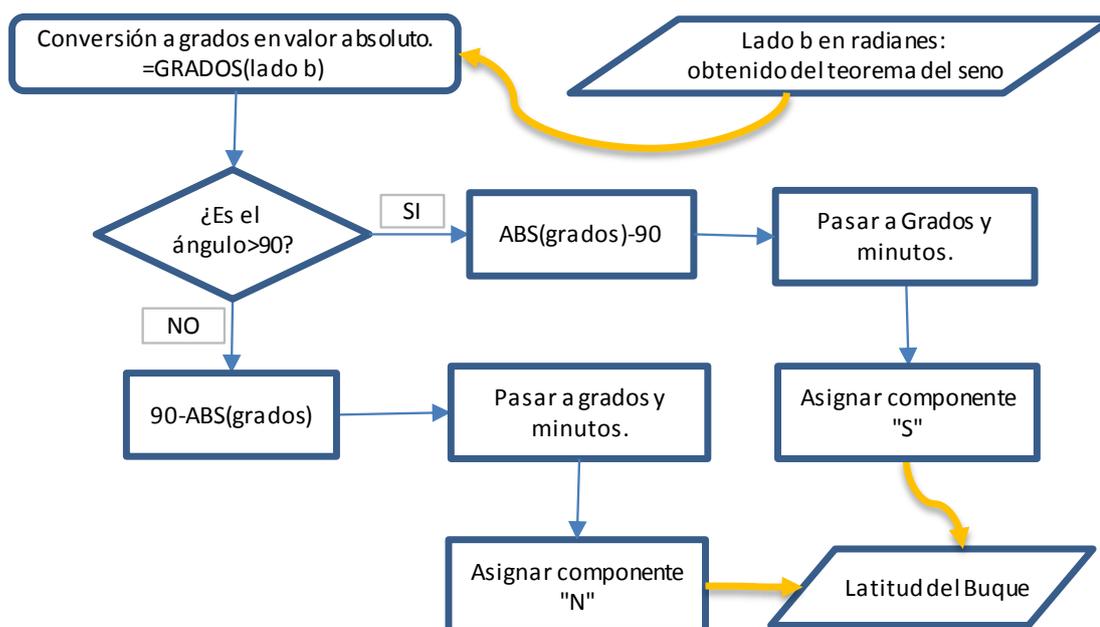


Figura 15: Elaboración propia.

Como se muestra en el flujograma, el resultado del lado obtenido en radianes es convertido a grados. Este lado entrega el valor del arco de meridiano comprendido entre el Polo Norte y el punto o vértice a referenciar sobre el ecuador (colatitud). Seguidamente se evalúa si es mayor de 90° para determinar si el valor del arco hasta el punto pasa del ecuador, teniendo en este caso latitud Sur y se le restan 90° . Si el lado es menor de 90° , la latitud es el ángulo complementario y tiene componente Norte, restándose entonces de 90° para obtener lo que dista del punto al ecuador.

$$=SI(Q2>90;Q2-90;90-Q2)$$

En la casilla que muestra la componente se inserta:

$$=SI(Q2>90;"S";"N")$$

Posteriormente es convertido a grados y minutos sexagesimales con la correspondiente componente. (aplicando "Transformar las entradas y las salidas" III.3.1.-).

Determinar la Longitud.

Calculado el ángulo ϕ o ángulo en el polo, se obtiene el valor de la diferencia en Longitud de la estación costera al buque.

Con este incremento en longitud (ángulo ϕ) aplicada a la longitud conocida de la estación costera se determina la longitud del buque. La conversión de demoras a ángulos esféricos se realiza asumiendo que las señales son recibidas de ángulos contados desde el Norte, que van de 000° a 180° hacia el Este o el Oeste. La componente asignada al ángulo esférico, obtenido de la demora de la estación, determina si el incremento de longitud del ángulo ϕ es hacia el Este o el Oeste. Esto le asigna el signo para ser sumada a la longitud de la estación costera, la cual tiene asignado el signo en función de su componente.

La suma algebraica se realiza aplicando el criterio siguiente:

- Al Este "E" son negativos y al Oeste "W" positivos.
- La longitud de la Estación Costera determina el signo de esta (λ_{EC}).
- El ángulo ϕ ($\Delta\lambda$ en las fórmulas) toma el signo de la componente de recepción de la señal por la Estación Costera. Si recibe por el "E" el ángulo ϕ se convierte entonces en un incremento de longitud hacia el Este de la Estación Costera, y por lo tanto negativo.

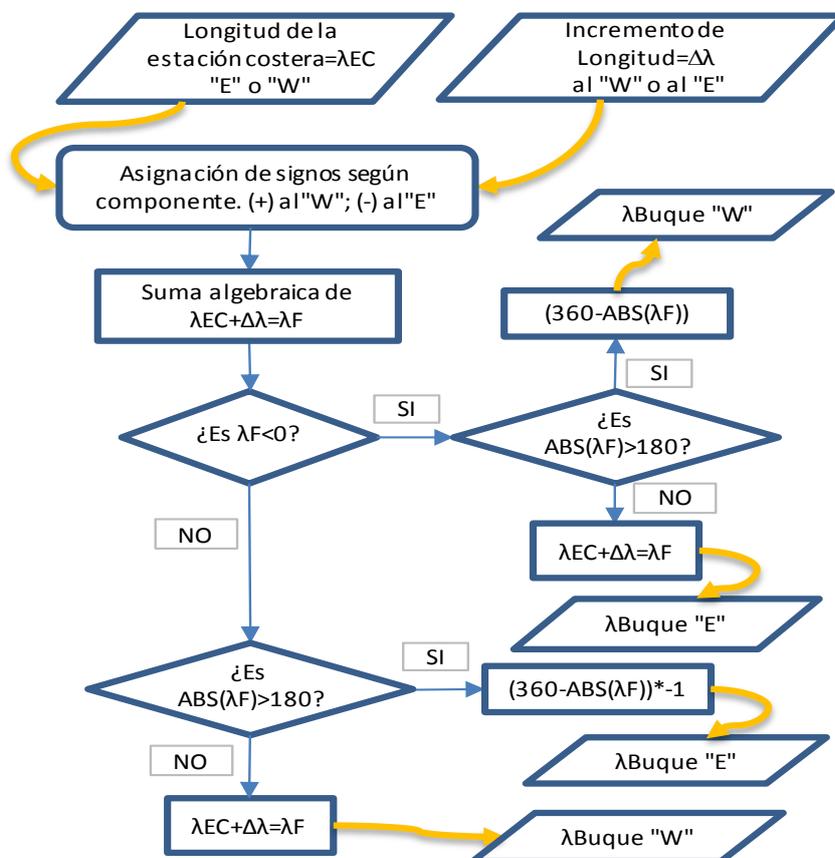


Figura 16: Elaboración propia.

$SI(\lambda F < 0; SI(ABS(\lambda F) > 180; 360 - ABS(\lambda F); \lambda F); SI(ABS(\lambda F) > 180; (360 - ABS(\lambda F)) * -1; \lambda F))$

En una casilla es sumado el ángulo ϕ a la longitud de la EC, ambas con su signo. En otra casilla se inserta la fórmula anterior que entrega el dato a convertir a grados y minutos. El signo de esta determina la componente con la expresión:

$SI(\lambda F < 0; "E"; "W")$

La función siguiente integra el cálculo anterior de una forma más resumida y clara. Mediante el procedimiento para tratar las diferencias de longitud impartido en el Máster (Sánchez Díaz de la Campa, 2017).

$SI(ABS(\lambda F) > 180; (360 - ABS(\lambda F)) * SIGNO(\lambda EC) * -1; \lambda F)$

En el flujograma siguiente se muestran los pasos seguidos para implementar la función anterior y llegar a la salida que define la longitud buscada.

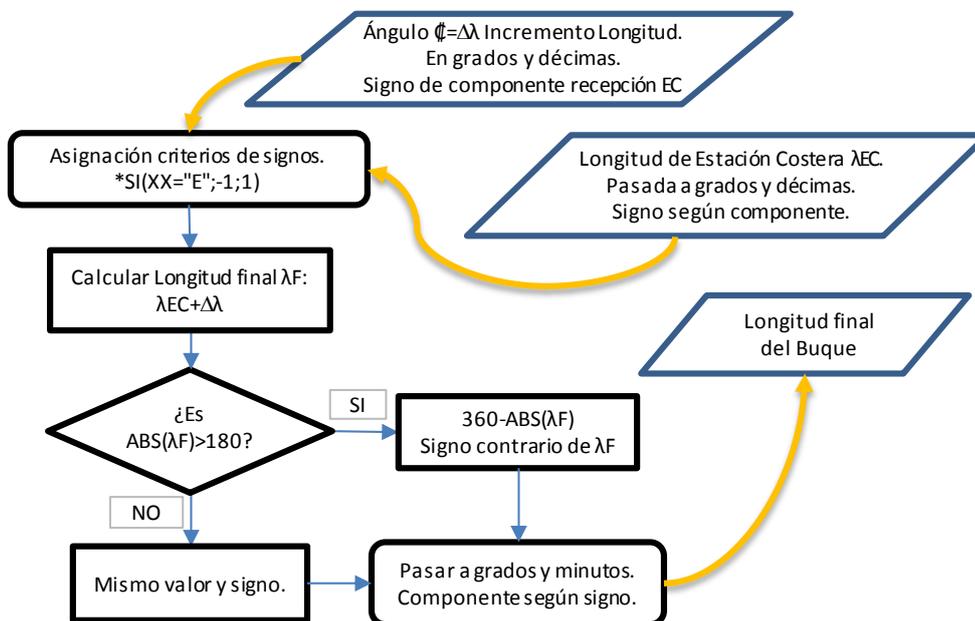


Figura 17: Elaboración propia.

IV.- CONCLUSIONES

IV.1.- Resultados del capítulo de Aplicación práctica.

La hoja de cálculo elaborada cumple las **hipótesis de resultado** planteadas:

1. La primera hoja del archivo dispone de una **zona de entrada de datos**. Todos los cálculos del problema se rehacen al cambiar el contenido de la zona de entrada de datos.
2. La primera hoja del archivo dispone de una **zona para la salida de resultados**. Las celdas de esta zona entregan la latitud y longitud de del buque.
3. Ambas zonas muestran las latitudes y longitudes en grados y minutos sexagesimales, y el signo se indica con las letras “S”, “N”, “E”, “W”.
4. La hoja de cálculo trata casos particulares y dobles soluciones.

IV.2.- Resúmenes de la utilidad de la metodología.

1. La metodología desarrollada permite resolver problemas de astronomía y navegación basados en fórmulas de la trigonometría esférica.
2. Los flujogramas han resultado de suma utilidad a la hora de describir tanto el tratamiento de las dobles soluciones como de los casos particulares.
3. Algunas partes de la metodología descrita tiene utilidad a la hora de automatizar otros cálculos diferentes a los basados en la trigonometría esférica.

IV.3.- Consejos para aplicar la metodología

1. Deben revisarse el recorrido de las funciones trigonométricas inversas.
2. Para cada planteamiento de resolución (caso) se ha de atender cada fórmula a emplear.
3. Cada fórmula se debe analizar revisando los casos particulares y las dobles soluciones.

IV.4.- Posibles líneas de indagación futuras.

Se comprobará la precisión de las situaciones obtenidas por radiogoniómetro comparándolas con las simultáneas de GPS.

Evaluados los resultados con los dos sistemas realizados se determinará la precisión obtenida. Con esto se podrá analizar los márgenes de error cometidos y descartar o abrir nuevas vías para la mejora de un sistema basado en el principio propuesto.

El objetivo pretendido es quedar cerca de los mínimos requeridos por la OMI según Resolución A953(23) para ser considerado un posible Sistema Mundial de Radionavegación.

Se podrían realizadas pruebas con datos de campo que permitan evaluar la precisión del planteamiento propuesto, estudiando aplicaciones para minimizar el error. Planteamientos similares a las rectas de altura empleadas en navegación astronómica pueden reducir el error y mejorar la precisión.

Referencias citadas

Barrero Ripoll, M., Casado Fuente, M. L., Castejón Solanas, M. Á. & Sebastián Lorente, L., 2008. *Trigonometría Esférica Fundamentos*. Madrid: E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid.

Frank Ayres, J. R., 1987. *Trigonometría Plana y Esférica*. s.l.:Macgraw-Hill.

Galloway, D., 2002. *Mejora continua de procesos*. s.l., Gestión 2000.

Itsaso, I. & Gaztelu-Iturri, R., 2002. *Fundamentos de Navegación Marítima*. s.l.:Universidad del País Vasco.

Jiménez, M. C. y. M., 1966. *Manual de Navegación*. Madrid: Gráficas Ruan.

Martín, M. A. I., 2004. *Trigonometría Esférica. Teoría y problemas resueltos.* s.l.:Universidad del País Vasco.

Ministry of Defence (Navy), 1982. *Manual of Seamanship*. Londres: HMSO.

Nautical, DBG, 2017. *Navigation Calculator*, s.l.: Software libre Android. Google Play Store..

OMI, 2003. *Resolución A 953(23)*. s.l., s.n.

Organización Marítima Internacional, OMI, 2002. *SOLAS*. Londres: Organización Marítima Internacional.

Rohde & Schwarz, 2015. *Rohde&Schwarz.com*. <https://www.rohde-schwarz.com/es/> [Último acceso: Mayo 2018].

Sánchez Díaz de la Campa, F. J., 2017. *Temario Asignatura Formación Investigadora*. s.l.:Universidad de Cantabria.

ANEXOS

Resolución A 953(23) de la OMI

INFORME REVISADO SOBRE EL ESTUDIO DE UN SISTEMA MUNDIAL DE RADIONAVEGACIÓN

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Desde 1983 se han venido realizando estudios sobre un sistema mundial de radionavegación. Dichos estudios han sentado las bases para enmendar el capítulo V del Convenio SOLAS 1974 e incluir una prescripción que obliga a los buques a llevar a bordo medios para recibir en todo momento las transmisiones procedentes de sistemas de radionavegación adecuados durante el viaje previsto.

1.2 Las prescripciones operacionales de los sistemas mundiales de radionavegación figuran en el apéndice.

1.3 No se considera viable que la OMI financie un sistema mundial de radionavegación. Por consiguiente, se han estudiado los sistemas existentes o previstos, establecidos y explotados por gobiernos u organizaciones, con objeto de determinar las condiciones en que tales sistemas podrían ser reconocidos o aceptados por la OMI.

2 PROCEDIMIENTOS Y RESPONSABILIDADES RELATIVOS AL RECONOCIMIENTO DE LOS SISTEMAS

2.1 Procedimientos y funciones de la OMI

2.1.1 El reconocimiento por la OMI de un sistema de radionavegación significaría que la Organización reconoce que el sistema puede proporcionar información adecuada para determinar la situación dentro de su zona de cobertura y que el equipo receptor que han de llevar los buques para utilizar el sistema satisface las prescripciones pertinentes del Convenio SOLAS 1974, enmendado.

2.1.2 La OMI no reconocerá ningún sistema de radionavegación sin el consentimiento del gobierno u organización que lo haya establecido y explote.

2.1.3 Para decidir si conviene o no reconocer un sistema de radionavegación, la OMI tendrá en cuenta si:

- el Gobierno o la organización que ha establecido y explota el sistema ha declarado oficialmente que éste está en servicio y puede ser utilizado por la marina mercante;
- se garantiza la continuidad del mismo;
- el sistema puede proporcionar información sobre la situación dentro de la zona de cobertura declarada por el Gobierno o la organización que ha establecido y explota el sistema, con un nivel de eficacia no inferior al indicado en el apéndice;
- se han tomado medidas adecuadas para publicar las características y parámetros del sistema y su estado, incluidas las modificaciones necesarias; y
- se han tomado medidas adecuadas para proteger la seguridad de la navegación en caso de que sea necesario introducir cambios en las características o parámetros del sistema que pudieran afectar negativamente al funcionamiento del equipo receptor de a bordo.

2.1.4 Cuando se modifique de alguna manera un sistema reconocido, se aplicarán los criterios enumerados en el párrafo 2.1.3 para decidir si debe mantenerse el reconocimiento otorgado.

2.2 Responsabilidades de los gobiernos u organizaciones

2.2.1 La responsabilidad de establecer y explotar un sistema de radionavegación incumbe a los gobiernos u organizaciones interesados.

2.2.2 Los gobiernos u organizaciones que deseen que la OMI reconozca un sistema de radionavegación, notificarán oficialmente a la Organización que el sistema está en servicio y a disposición de la marina mercante. El Gobierno u organización indicará también la zona de

cobertura del sistema y facilitará cualquier otra información que sea posible para ayudar a la OMI a aplicar los criterios indicados en el párrafo 2.1.3.

2.2.3 Los gobiernos u organizaciones que tengan un sistema reconocido por la OMI no permitirán que se modifiquen las características operacionales del sistema que dieron lugar al reconocimiento sin notificarlo a la Organización (véase la resolución A.577(14)).

3 EQUIPO RECEPTOR DE A BORDO

3.1 A fin de evitar la necesidad de que un buque tenga que llevar a bordo más de un aparato receptor, el equipo receptor de a bordo debe poder funcionar tanto con un sistema mundial de radionavegación como con los sistemas de radionavegación que ofrezcan cobertura en las zonas por las que navegue el buque.

3.2 El equipo receptor de a bordo se ajustará a normas de funcionamiento pertinentes que no serán inferiores a las adoptadas por la Organización.

3.3 Los sistemas de radionavegación permitirán que el equipo receptor de a bordo seleccione automáticamente las estaciones adecuadas para determinar la situación del buque con la eficacia requerida.

3.4 El equipo receptor de a bordo estará provisto de al menos un dispositivo de salida* que permita suministrar a otros equipos información sobre la situación en forma normalizada.

* Publicación 61162 de la CEI.

APÉNDICE

PRESCRIPCIONES OPERACIONALES

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Las prescripciones operacionales de los sistemas mundiales de radionavegación serán de carácter general y podrán ser satisfechas por varios sistemas. Todos los sistemas podrán ser utilizados por un número ilimitado de buques.

1.2 Las prescripciones podrán ser satisfechas con un solo sistema de radionavegación o con una combinación de varios.

1.3 Para los buques que operen a velocidades superiores a 30 nudos tal vez sea necesario establecer prescripciones más rigurosas.

2 NAVEGACIÓN EN LAS ENTRADAS Y ACCESOS A PUERTOS Y EN LAS AGUAS COSTERAS CON UN VOLUMEN CONSIDERABLE DE TRÁFICO O UN ELEVADO GRADO DE RIESGO*

2.1 Cuando se utilice un sistema de radionavegación para ayudar a los buques a navegar en todas las aguas de estas características, el sistema, incluida cualquier intensificación del mismo, proporcionará información sobre la situación con un error no superior a 10 metros y con una probabilidad del 95%.

2.2 Teniendo en cuenta el espectro de radiofrecuencias, la cobertura del sistema será adecuada para que se pueda determinar la situación durante toda esta fase de la navegación.

2.3 La frecuencia de actualización de los datos sobre la situación calculados y presentados será superior a una vez cada 10 segundos. Si los datos calculados sobre la situación se utilizan para el SIA, para una presentación gráfica o para el control directo del buque, la frecuencia de actualización será superior a una vez cada 2 segundos**.

2.4 La disponibilidad de la señal será superior al 99,8%, medida durante un periodo de dos años***.

2.5 Cuando el sistema esté disponible, la continuidad del servicio será >99,97%, medida durante tres horas.

2.6 Los usuarios recibirán un aviso de la falta de disponibilidad o interrupción del sistema en menos de 10 segundos.

* La regla V/13 del Convenio SOLAS prescribe que todo Gobierno Contratante establezca, según estime factible y necesario, ya sea individualmente o en colaboración con otros Gobiernos Contratantes, las ayudas a la navegación que justifique el volumen de tráfico y exija el grado de riesgo.

** Esto es aplicable a los datos sobre la situación calculados y presentados, pero no a la frecuencia de actualización de los datos de corrección, cuyo periodo de validez es de 30 segundos, aproximadamente.

*** Calculada de conformidad con las indicaciones dadas en la Recomendación R - 121 de la AISM, sobre el rendimiento y vigilancia de los servicios DGNSS en la banda de frecuencias 283,5 - 325 KHz.

3 NAVEGACIÓN EN LAS ENTRADAS Y ACCESOS A PUERTOS Y EN LAS AGUAS COSTERAS CON UN VOLUMEN MENOR DE TRÁFICO O UN GRADO INFERIOR DE RIESGO*

3.1 Cuando se utilice un sistema de radionavegación para ayudar a los buques a navegar en aguas de estas características, el sistema, incluida cualquier intensificación del mismo, proporcionará información sobre la situación con un error no superior a 10 metros y con una probabilidad del 95%.

3.2 Teniendo en cuenta el espectro de radiofrecuencias, la cobertura del sistema será adecuada para que se pueda determinar la situación durante toda esta fase de la navegación.

3.3 La frecuencia de actualización de los datos sobre la situación calculados y presentados será superior a una vez cada 10 segundos. Si los datos calculados sobre la situación se utilizan para el SIA, para una presentación gráfica o para el control directo del buque, la frecuencia de actualización será superior a una vez cada dos segundos**.

3.4 La disponibilidad de la señal será superior al 99,5%, medida durante un periodo de dos años***.

3.5 Cuando el sistema esté disponible, la continuidad del servicio será >99,85%, medida durante tres horas.

3.6 Los usuarios recibirán un aviso de la falta de disponibilidad o interrupción del sistema en menos de 10 segundos.

4 NAVEGACIÓN EN AGUAS OCEÁNICAS

4.1 Cuando se utilice un sistema de radionavegación para ayudar a los buques a navegar en aguas oceánicas, el sistema proporcionará información sobre la situación con un error no superior a 100 metros y con una probabilidad del 95%. Este grado de precisión es adecuado para la navegación en general y para suministrar información sobre la situación en el SMSSM.

4.2 Teniendo en cuenta que las flotas mercantes operan en todo el mundo, la información que proporcione un sistema de navegación debe ser adecuada para la navegación general de los buques dedicados a efectuar viajes internacionales en cualesquiera aguas oceánicas.

4.3 Teniendo en cuenta el espectro de radiofrecuencias, la cobertura del sistema será adecuada para que se pueda determinar la situación durante toda esta fase de la navegación.

* La regla V/13 del Convenio SOLAS prescribe que todo Gobierno Contratante establezca, según estime factible y necesario, ya sea individualmente o en colaboración con otros Gobiernos Contratantes, las ayudas a la navegación que justifique el volumen de tráfico y exija el grado de riesgo.

** Esto es aplicable a los datos sobre la situación calculados y presentados, pero no a la frecuencia de actualización de los datos de corrección, cuyo periodo de validez es de 30 segundos aproximadamente.

*** Calculada de conformidad con las indicaciones dadas en la Recomendación R - 121 de la AISM, sobre el rendimiento y vigilancia de los servicios DGNSS en la banda de frecuencias 283,5 - 325 KHz.

4.4 La frecuencia de actualización de los datos sobre la situación calculados y presentados será superior a una vez cada 10 segundos. Si los datos calculados sobre la situación se utilizan para el SIA, para una presentación gráfica o para el control directo del buque, la frecuencia de actualización será superior a una vez cada dos segundos.

4.5 La disponibilidad de la señal será superior al 99,8%, medida durante un periodo de 30 días.

4.6 Los usuarios recibirán tan pronto como sea factible un aviso de la falta de disponibilidad o interrupción del sistema mediante un mensaje de información sobre seguridad marítima (ISM).