

# **Universidad Nacional de Educación a Distancia**

Máster en Ingeniería de Sistemas y de Control

**Proyecto Fin de Máster**

## **Optimización Heurística de Trayectorias de Buques con Datos de Oleaje y Hielo Polar**



Alumno: **Juan Nicolás Heredia**

Directora: **Eva Besada Portas**

Curso académico 2017-2018

Convocatoria de defensa: Septiembre

**Máster en Ingeniería de Sistemas y de Control**

**Optimización Heurística de Trayectorias de Buques con  
Datos de Oleaje y Hielo Polar**

**Alumno: Juan Nicolás Heredia**

**Directora: Eva Besada Portas**

## Autorización



Autorizamos a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y a la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a sus autores, tanto la memoria de este Trabajo Fin de Máster, como el código, la documentación y/o el prototipo desarrollado.

Firmado:

Firma del alumno

## *Agradecimientos*

Quiero dar mi más sincero agradecimiento a mi directora del Trabajo Fin de Máster, Eva Besada Portas, por todas las atenciones y el tiempo que me ha dedicado, así como por sus ánimos en los momentos en los que el proyecto parecía atascarse y no llegar a tiempo.

También a mi novia Elena y a mi madre Carmen, a las que tanto tiempo he quitado sin por ello dejar de recibir su apoyo y cariño.

# Resumen

El presente Trabajo fin de Master se enmarca dentro del problema de la planificación y optimización de trayectorias para Buques Comerciales, con el afán de hacerlas mínimas en coste económico para los operadores pero globalmente seguras.

La motivación para desarrollarlo se basa en la incipiente apertura de nuevas rutas marítimas en el Ártico, merced al acelerado calentamiento global experimentado durante los últimos años. Éstas se hacen transitables durante un mayor número de semanas al año, abriendo la posibilidad a realizar rutas alternativas entre puertos septentrionales de Norteamérica o Europa hacia el Extremo Oriente, con ahorros de combustible de hasta el 40% para una ruta media de ese tipo.

Por tanto, en muchas de las rutas comerciales no es inmediato conocer de antemano qué ruta es la mejor para unir dos puertos, con lo que una herramienta sistemática y computacionalmente eficiente se convierte en una ventaja para las navieras, sobre todo teniendo en cuenta que los pasos árticos no son fáciles de determinar a priori (debido a los estrechos canales que muchas veces deja el hielo), y que incluso eligiendo la ruta del norte, podría no estar claro cuál de las posibles sería la mejor.

La herramienta desarrollada permite, usando Algoritmos Genéticos combinados con técnicas clásicas deterministas de la Teoría de Grafos (algoritmo A\*), utilizar datos reales y recientes, tanto de alcance de hielo como de predicciones meteorológicas, para calcular la ruta más económica entre dos puertos cualesquiera del mundo.

**Palabras clave:** Planificador de Trayectorias, Optimización Heurística, Algoritmos Genéticos, Algoritmo A\*, Meteorología, Hielo Polar, Oleaje, Buques comerciales, Paso del Noroeste

# Índice

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....                                      | 11 |
| 1.1 IDEA GENERAL Y CONTEXTO .....                                 | 11 |
| 1.2 ESTADO DEL ARTE.....  | 12 |
| 1.3. MOTIVACIÓN.....  | 14 |
| 1.4. OBJETIVOS.....   | 16 |
| 1.5. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA .....                             | 17 |
| CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN Y MODELO DEL PROBLEMA.....                | 19 |
| 2.1. VARIABLES DE DECISIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DE SOLUCIONES.....   | 19 |
| 2.2. MODELO MATEMÁTICO, ENTRADAS Y FUENTES DE RESTRICCIONES ..... | 23 |
| 2.2.1 FUENTE DE DATOS DE CONTORNOS CONTINENTALES .....            | 25 |
| 2.2.2 FUENTE DE DATOS DE CONTORNOS DE HIELO .....                 | 26 |
| 2.2.3 FUENTE DE DATOS METEOROLÓGICOS .....                        | 29 |
| 2.3. FUNCIÓN DE MÉRITO.....                                       | 31 |
| 2.3.1 CONSUMO DE COMBUSTIBLE .....                                | 31 |
| 2.3.2 PENALIZACIÓN POR RESTRICCIÓN .....                          | 32 |
| 2.3.3 COSTES OPERATIVOS .....                                     | 34 |
| 2.3.4 COSTES DEL ROMPEHIELOS .....                                | 34 |
| 2.3.5 COSTES POR PEAJES .....                                     | 34 |
| 2.3.6 COSTES TOTAL .....  | 34 |
| CAPÍTULO 3: ALGORITMOS EMPLEADOS.....                             | 35 |
| 3.1. GENERALIDADES.....   | 35 |
| 3.1.1 ALGORITMO A-ESTRELLA .....                                  | 35 |
| 3.1.2 ALGORITMO GENÉTICO .....                                    | 37 |
| 3.1.2.1. GENERACIÓN .....   | 38 |
| 3.1.2.2. SELECCIÓN .....  | 38 |
| 3.1.2.3. CRUCE .....  | 39 |
| 3.1.2.4. MUTACIÓN.....  | 40 |
| 3.1.2.5. RECOMBINACIÓN.....                                       | 41 |
| 3.1.2.6. CRITERIO DE PARADA.....                                  | 42 |
| 3.2. ADAPTACIÓN HEURÍSTICA DE LOS ALGORITMOS.....                 | 42 |
| 3.2.1 ALGORITMO A-ESTRELLA.....                                   | 42 |
| 3.2.2 ALGORITMO GENÉTICO .....                                    | 47 |
| 3.2.2.1. GENERADOR DE TRAYECTORIAS INICIALES.....                 | 47 |
| 3.2.2.2 FUNCIÓN DE SELECCIÓN .....                                | 53 |
| 3.2.2.3 FUNCIÓN DE CRUCE.....                                     | 54 |
| 3.2.2.4 FUNCIÓN DE MUTACIÓN .....                                 | 54 |
| 3.2.2.5 FUNCIÓN DE RECOMBINACIÓN.....                             | 56 |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.2.2.6 FUNCIÓN DE PARADA.....                                  | 56        |
| <b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA.....</b> | <b>57</b> |
| 4.1. RESULTADOS .....   | 57        |
| 4.2. CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA .....                          | 63        |
| ESCENARIO BUENOS AIRES – REIKIVAIK .....                        | 65        |
| ESCENARIO DUBAI - BUSAN .....                                   | 66        |
| ESCENARIO ESTOCOLMO - RÍO DE JANEIRO.....                       | 67        |
| ESCENARIO GIJÓN – BUSÁN.....                                    | 68        |
| ESCENARIO GLASGOW - SHANGAI.....                                | 70        |
| ESCENARIO MIAMI – NÁPOLES .....                                 | 71        |
| ESCENARIO PT-MORESBY - LOS ÁNGELES .....                        | 72        |
| ESCENARIO PT-ARMUELLES - TOKIO .....                            | 73        |
| ESCENARIO SIDNEY - BANGKOK .....                                | 75        |
| ESCENARIO SINGAPUR - NÁPOLES.....                               | 76        |
| ESCENARIO SINGAPUR - REIKIAVIK.....                             | 79        |
| ESCENARIO TOKIO - CASABLANCA.....                               | 81        |
| ESCENARIO VLADIVOSTOK - ADÉN .....                              | 83        |
| ESCENARIO VLADIVOSTOK - SEBASTOPOL .....                        | 84        |
| ESCENARIO ESTOCOLMO - REIKIAVIK .....                           | 85        |
| ESCENARIO PTMORESBY - CASABLANCA .....                          | 87        |
| <b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....</b>                           | <b>90</b> |
| 5.1 CONCLUSIONES.....   | 90        |
| 5.2 TRABAJOS FUTUROS .....                                      | 92        |
| REFERENCIAS .....   | 95        |
| LISTA DE SIGLAS .....   | 97        |

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1 ESQUEMA CON LAS 3 POSIBLES ALTERNATIVAS EN EL PASO DEL NOROESTE PARA AÑOS DE ESPECIAL ACORTAMIENTO DEL HIELO ÁRTICO DURANTE EL FINAL DEL VERANO ..... | 15 |
| FIGURA 2: EJEMPLO SENCILLO DE SOLUCIÓN OBTENIDA CON A-ESTRELLA PARA UNA CUADRÍCULA PEQUEÑA .....   | 20 |
| FIGURA 3 DETALLE DEL TAMAÑO CARACTERÍSTICO DE LOS PASOS MÁS ESTRECHOS ATRAVESADOS EN RUTAS CLÁSICAS DEL PNW .....  | 21 |
| FIGURA 4 EJEMPLO DE SALIDA DEL A*, PARA LA TRAYECTORIA P.ARMUELLES (PANAMÁ)-ADÉN (YEMEN) .....   | 23 |
| FIGURA 5 EJEMPLO DE PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA POLAR .....  | 27 |
| FIGURA 6 DETALLE DE LA ZONA DEL ÁRTICO CANADIENSE CON EXTENSIONES MÁXIMA Y MÍNIMA ANUAL DEL HIELO .....  | 28 |
| FIGURA 7 AMPLIACIÓN DE LA ZONA DE FIG. 2.5 EN QUE SE MUESTRA EL DETALLE DE LA HABITUAL ESTRECHEZ DEL NWP ....  | 28 |
| FIGURA 8 PROYECCIÓN DEL PLANETA CON LAS ISLAS CONSIDERADAS Y EL HIELO ÁRTICO A 23-SEP-2017 .....   | 29 |
| FIGURA 9 EJEMPLO DE TRAYECTORIA GENERADA COMBINADA CON CAMPO VECTORIAL DE OLEAJE .....   | 30 |
| FIGURA 10 EJEMPLO DE VISUALIZACIÓN GRÁFICA DE LOS PUNTOS DE CORTE (EN VERDE) DE UNA TRAYECTORIA CON LAS RESTRICCIONES .....                                    | 33 |
| FIGURA 11 CONJUNTO DE LOS CONTINENTES Y SUS INTERIORES CON PRECISIÓN GSSH 'COARSE' Y BORDE DEL HIELO EN MAGENTA.....   | 44 |
| FIGURA 12 EXPLICACIÓN GRÁFICA DE LOS PROBLEMAS ENCONTRADOS A LA HORA DE DISCRETIZAR LOS CONTORNOS DE HIELO .....   | 45 |
| FIGURA 13 SOLUCIÓN APROXIMADA AL PROBLEMA DE OBTENER UN NÚMERO SUFICIENTE PUNTOS INTERIORES (AZUL) AL CONTORNO DE HIELO .....                                  | 46 |
| FIGURA 14 CONTORNO EMPÍRICO ARTIFICIAL (ROJO) DE HIELO USADO PARA DAR LA OPORTUNIDAD DE EXPLORAR TRAYECTORIAS POSIBLEMENTE FACTIBLES .....                     | 48 |
| FIGURA 15 DETALLE DE LA MODIFICACIÓN EFECTUADA PARA CONSEGUIR UN PASO FINO POR EL CANAL DE SUEZ RESPECTO AL TRAZO GRUESO EN VERDE DEL A* .....                 | 51 |
| FIGURA 16 EJEMPLO DE GENERACIÓN GAUSSIANA CON MEDIA EN SOLUCIÓN DE A*, EN FORMA DE INCREMENTOS PARABÓLICOS .....   | 51 |
| FIGURA 17 EJEMPLO DE GENERACIÓN GAUSSIANA CON MEDIA EN SOLUCIÓN DE A*, EN FORMA DE INCREMENTOS PARABÓLICOS. TRAYECTORIA TOKIO-NYC.....                         | 52 |
| FIGURA 18 DETALLE DEL SUAVIZADO DE LAS TRAYECTORIAS CONSEGUIDO MEDIANTE FILTROS DE SAVITZKY-GOLAY .....  | 53 |
| FIGURA 19 EJEMPLO DEL COMPORTAMIENTO DE LA MUTACIÓN ALREDEDOR DE DOS PEQUEÑAS ISLAS PARTIENDO DE LA TRAYECTORIA DE A* .....                                    | 56 |
| FIGURA 20 DETALLE DE LA TRAYECTORIA FACTIBLE GIJÓN-BUSAN (12-9-17) CON $\sigma_{GEN}=0.05$ , 16 WPs Y $MMUT=0.14$ ...  | 60 |
| FIGURA 21 DETALLE DE LA TRAYECTORIA (ROJA) NO FACTIBLE NYC-TOKIO (3-9-17) CON $\sigma_{GEN}=0.03$ , 16 WPs Y $M\_MUT=0.26$ Y 56 ITERACIONES MÁXIMAS.....       | 61 |
| FIGURA 22 TRAYECTORIA NYC-TOKIO (EN ROJO) FACTIBLE TRAS 70 ITERACIONES CON $\sigma_{GEN}=0.03$ , 16 WPs Y $M\_MUT=0.26$ .....                                  | 62 |
| FIGURA 23 DETALLE DE LA TRAYECTORIA (ROJA) NO FACTIBLE VLADIVOSTOK-SEBASTOPOL (12-9-17) CON $\sigma_{GEN}=0.05$ , 22 WPs Y $M\_MUT=0.14$ .....                 | 63 |
| FIGURA 24 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. B.AIRES-REIKIAVIK, $VARGEN=0.05$ .....  | 65 |
| FIGURA 25 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. B.AIRES-REIKIAVIK, $VARGEN=0.1$ .....   | 65 |
| FIGURA 26 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. DUBAI-BUSÁN, $VARGEN=0.05$ .....  | 66 |
| FIGURA 27 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. DUBAI-BUSÁN, $VARGEN=0.1$ .....   | 67 |
| FIGURA 28 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. ESTOCOLMO-R.JANEIRO, $VARGEN=0.05$ .....  | 67 |
| FIGURA 29 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. ESTOCOLMO-R.JANEIRO, $VARGEN=0.1$ .....   | 68 |
| FIGURA 30 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. GIJÓN-BUSAN, $VARGEN=0.05$ .....  | 69 |
| FIGURA 31 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. GIJÓN-BUSAN, $VARGEN=0.1$ .....   | 69 |
| FIGURA 32 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. GLASGOW-SHANGAI, $VARGEN=0.05$ .....  | 70 |
| FIGURA 33 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. GLASGOW-SHANGAI, $VARGEN=0.1$ .....   | 70 |
| FIGURA 34 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. MIAMI-NÁPOLES, $VARGEN=0.05$ .....  | 71 |
| FIGURA 35 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. MIAMI-NÁPOLES, $VARGEN=0.1$ .....   | 72 |
| FIGURA 36 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. PTMORESBY-LOS ÁNGELES, $VARGEN=0.05$ .....  | 72 |
| FIGURA 37 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. PTMORESBY-LOS ÁNGELES, $VARGEN=0.1$ .....   | 73 |
| FIGURA 38 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. PTARMUELLES-TOKIO, $VARGEN=0.05$ .....  | 74 |
| FIGURA 39 MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. PTARMUELLES-TOKIO, $VARGEN=0.1$ .....   | 74 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| FIGURA 40 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. SIDNEY-BANGKOK, VAR_GEN=0.05 .....   | 75 |
| FIGURA 41 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. SIDNEY-BANGKOK, VARGEN=0.1 .....   | 75 |
| FIGURA 42 | SOLUCIÓN ÓPTIMA SIDNEY-BANGKOK, BENEFICIADA POR UN ALTO NÚMERO DE WPS PAR CABOTAR<br>EFICIENTEMENTE A LO LARGO DE LA COSTA DE AUSTRALIA .....         | 76 |
| FIGURA 43 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. SINGAPUR-NÁPOLES, VARGEN=0.05.....   | 78 |
| FIGURA 44 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. SINGAPUR-NÁPOLES, VARGEN=0.1 .....   | 78 |
| FIGURA 45 | RESULTADOS DE LA FUNCIÓN DE GENERACIÓN CON NWP=22 (A) Y 16 (B) ALREDEDOR DEL CANAL DE SUEZ ....   | 79 |
| FIGURA 46 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. SINGAPUR-REIKIAVIK, VARGEN=0.05 .....  | 80 |
| FIGURA 47 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. SINGAPUR-REIKIAVIK, VARGEN=0.1 .....   | 80 |
| FIGURA 48 | ESCENARIO SINGAPUR-REIKIAVIK CON 16 WPS .....   | 81 |
| FIGURA 49 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. TOKIO-CASABLANCA, VARGEN=0.05.....   | 82 |
| FIGURA 50 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. TOKIO-CASABLANCA, VARGEN=0.1 .....   | 82 |
| FIGURA 51 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. VLADIVOSTOK-ADEN, VARGEN=0.05 .....  | 83 |
| FIGURA 52 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. VLADIVOSTOK-ADEN, VARGEN=0.1 .....   | 83 |
| FIGURA 53 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. VLADIVOSTOK-ADEN, VARGEN=0.05 .....  | 84 |
| FIGURA 54 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. VLADIVOSTOK-ADEN, VARGEN=0.1 .....   | 84 |
| FIGURA 55 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. ESTOCOLMO-REIKIAVIK, VARGEN=0.05 .....   | 85 |
| FIGURA 56 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. ESTOCOLMO-REIKIAVIK, VARGEN=0.1 .....  | 86 |
| FIGURA 57 | DETALLE DE LA ZONA BÁLTICA DE LA TRAYECTORIA ESTOCOLMO-REIKIAVIK .....  | 86 |
| FIGURA 58 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. PTMORESBY-CASABLANCA, VARGEN=0.05 .....  | 87 |
| FIGURA 59 | MEDIA Y VARIANZA DE LA PENALIZACIÓN. PTMORESBY-CASABLANCA, VARGEN=0.05 .....  | 87 |
| FIGURA 60 | RESULTADOS DE LA FUNCIÓN DE GENERACIÓN CON NWP=22 (A) Y 16 (B) ALREDEDOR DEL CANAL DE SUEZ PARA<br>EL ESCENARIO PTMORESBY-CASABLANCA .....            | 88 |
| FIGURA 61 | EJEMPLO DE ORTODRÓMICA ENTRE EL SUR DE NORUEGA Y EL SUR DE ISLANDIA QUE, SIENDO UNA IMPORTANTE<br>VENTAJA EN DISTANCIA, ACABA SIENDO DESCARTADA ..... | 93 |

## **Lista de Tablas**

|  |    |
|--|----|
| TABLA 1 LISTA DE PUERTOS USADOS COMO ORIGEN-DESTINO DE LAS OPTIMIZACIONES.....                                     | 24 |
| TABLA 2 RELACIÓN EMPÍRICA ENTRE ALTURA Y LONGITUD DE ONDA EN CONDICIONES DE MAR "TOTALMENTE DESARROLLADO"<br>..... | 30 |
| TABLA 3 LISTADO DE ESCENARIOS VISITADOS Y MEJOR RESULTADO DE FACTIBILIDAD OBTENIDO.....                            | 58 |

## Capítulo 1 Introducción

### 1.1 Idea general y contexto

Este Trabajo Fin de Master (TFM) tiene como objetivo, último y global, el desarrollo de un aplicación software que permita la optimización, en un tiempo razonable, de la trayectoria a seguir por un buque de largo alcance, dados la pareja de puertos de origen y destino, la fecha de comienzo del viaje, y los datos meteorológicos y de alcance del hielo polar en el Océano Ártico durante la travesía del buque. Dado que este problema de optimización de trayectorias (en el que se minimizará el coste económico del viaje para la compañía marítima dueña del buque) es fuertemente no lineal (debido a la complejidad de los contornos de costa y hielo que los buques deben salvar para que sus trayectorias sean físicamente realizables) el uso de técnicas deterministas únicamente basadas en la minimización de la distancia es insuficiente, por lo que la idea general desde el punto de vista de la técnica de resolución es el empleo de heurísticas, que sesguen la toma de decisiones automáticas del algoritmo con el conocimiento humano del problema (que en este caso es importante al haberse cumplido ya varios siglos de navegación marítima a lo largo del conjunto del globo).

Concretamente, la técnica elegida dentro del elenco de posibilidades heurísticas existentes es la de los Algoritmos Genéticos (GA por sus siglas en inglés), ya que se trata de una metodología relativamente sencilla de implementar, ampliamente utilizada a nivel industrial y conocida por el alumno (tanto desde su entorno académico como desde su nivel profesional). Además, para generar la población inicial del GA con soluciones (trayectorias) cuasi-realizables (esto es, que no irrumpen significativamente en zonas de navegación prohibidas como son los continentes y el hielo) se ha incorporado el algoritmo A-Estrella (en adelante, A\*), una técnica habitualmente usada en planificación de trayectorias de robots en entornos con obstáculos, que ha resultado de importancia crucial en este problema concreto

En un principio, puede parecer que, entre una pareja dada de los principales puertos de mercancías del mundo, la ruta más directa y eficiente está prefijada, al igual que sucede a la hora de planificar la ruta por carretera entre dos ciudades que por ejemplo están unidas por autovía. Y que dicha solución puede ser fácilmente almacenada en una base de datos para ser utilizada por los buques, salvo en situaciones de emergencia como un fenómeno meteorológico extremo o un conflicto bélico<sup>1</sup>. Sin embargo, factores difíciles de prever hasta hace pocos años, como son la información meteorológica, la altura y dirección de las olas, el alcance y grosor del hielo en las regiones Antárticas o Árticas (las últimas son de mayor interés, al concentrarse la mayor parte población y comercio mundial en el hemisferio norte), los ataques de piratería en el Océano Índico, y el significativo coste económico asociado al uso de los principales Canales (Suez y

---

<sup>1</sup> Por ejemplo la Guerra de Suez, que en 1956 enfrentó a Egipto frente a una coalición franco-británica e israelí, mantuvo cerrado durante unos meses el tráfico en el Canal de Suez

Panamá, siendo especialmente caro el primero, con un coste cercano al doble), hacen que un número importante de trayectorias entre puertos con alto volumen de tráfico no sean determinables inmediatamente. Esto hace que las técnicas heurísticas aquí presentadas tengan un interés especial. Por ejemplo, para una ruta entre los puertos de Rotterdam y Tokio, el paso tradicional por el Canal de Suez y el Estrecho de Malaca se ve reducido en un 40% de distancia y hasta 20 días de media si se utiliza el Paso del Noreste por las costas rusas de Siberia.

## 1.2 Estado del Arte

En primera instancia se ha llevado a cabo un estudio bibliográfico sobre las técnicas introducidas durante los últimos años para la planificación de trayectorias de diferentes vehículos. Aunque en el estudio del arte recogido en esta memoria se hace especial hincapié en las técnicas utilizadas para la planificación de trayectorias de buques, también se recogen alguna de las usadas en otros tipos de vehículos, como son los submarinos o aéreos no tripulados (donde la planificación automática es aún más importante). A continuación se presentan, de forma somera, las principales ideas encontradas.

En el artículo de Walther, Rizvanolli et al. [1], se aborda de forma exhaustiva un estado del arte de las técnicas usadas en la industria del transporte marítimo para optimizar trayectorias 2-D teniendo en cuenta datos meteorológicos. Esta revisión abarca técnicas clásicas como el Cálculo de Variaciones, la Programación Dinámica, pasando por técnicas más específicas como el Método de Isócronas (se optimiza la trayectoria teniendo en cuenta el tiempo y las condiciones que hay en cada punto de la trayectoria en el instante en que éstos son alcanzados), el método SIMPLEX, técnicas evolutivas como los GA (con funciones de coste mono y multi-objetivo tipo Pareto, en las que se propone dar como solución inicial trayectorias GCR - Great Circle Route-) y el Algoritmo de Dijkstra. Este último es muy similar a un clásico de la teoría de grafos, y del que se hablará con profusión en este trabajo: el algoritmo A\* o A-estrella [2].

También se abunda en esta técnica, y otras similares usadas en robótica, en [3], para planificación de trayectorias de servicios de rescate marítimo.

La estrecha relación entre la problemática planteada en [1] y una de las ideas de este Trabajo Fin de Master, hace que dicho artículo sea la base de la búsqueda bibliográfica realizada por el alumno. Adicionalmente, también se considera relevante, y por lo tanto se ha analizado con detenimiento el contenido de los siguientes trabajos:

- El artículo de Szlapczynski [4], que presenta una optimización con técnicas evolutivas de un problema conjunto de n-trayectorias de otros tantos barcos en un entorno realista y regulado por sistemas ya operativos como los Traffic Separation Schemes (TSS). Estos esquemas delimitan, sobre todo en puertos y cerca de cabos congestionados, carriles por los que pueden navegar los buques de forma segura (de acuerdo con las normas de la Organización Marítima Internacional). A su vez los carriles están separados lateralmente uno de otros (al igual que ocurre con las aerovías), y deben cumplir las restricciones impuestas COLREGS (en castellano, el reglamento internacional para prevenir abordajes). Considerando la existencia de una trayectoria óptima para cada barco (obtenida por ejemplo mediante técnicas de

computación evolutiva o con la propuesta realizada en [5]), el trabajo de Szlapczynski se centra en la optimización local, mediante AG, de las trayectorias de todos los barcos con el objetivo último de evitar las colisiones entre ellos. De este trabajo se extraen ideas de interés para el TFM, como son las penalizaciones asociadas a las restricciones estáticas (costas, hielo), que deben cumplirse tras modificar las trayectorias para evitar colisiones entre barcos, y que se modelan en dicho trabajo median una expresión cuadrática.

- El trabajo de Hornauer, Blaich et al. [6], que presenta una idea de planificación-negociación similar a la optimización local de [4] e incluye en las simulaciones utilizadas en la evaluación de las soluciones dos modelos dinámicos de maniobrabilidad diferentes para los buques: el de velocidad constante CV (adecuado para trayectorias rectilíneas) y el de velocidad angular de giro constante CTRV (preciso en buques que abandonan un carril de navegación para incorporarse a otro). Con estos modelos cada buque puede predecir donde se encontrarán los restantes  $n-1$  buques y construir un grid tridimensional  $G(x,y,t)$  en el que almacena, para cada instante  $t$  y celda  $(x,y)$  del mallado en el que se divide el espacio, su probabilidad de ocupación instantánea. Con dicha información probabilística, y por medio de un algoritmo A-estrella modificado, el buque en cuestión modifica su trayectoria original, teniendo en cuenta que los nuevos obstáculos, en lugar de ser puntos fijos (por ejemplo costa), son el resto de los buques. Ese proceso se repite con todos los barcos, y con las trayectorias así generadas se inicia un proceso de negociación basado en una técnica asociada a la Teoría de Juegos, que converge a la solución óptima de elusión del conflicto.

También se ha ahondado, en esta búsqueda bibliográfica, en otra idea surgida durante una primer solución del problema, que se realizó en la asignatura de Optimización Heurística de este mismo Master, y que se encuentra relacionada con la gestión de las penalizaciones asociadas a las zonas no factibles del espacio geográfico de búsqueda (relacionadas principalmente con las zonas continentales no navegables). En dicha aproximación se permitía que el algoritmo trabajase con soluciones no factibles y que las penalizase significativamente añadiendo a la función de coste un término proporcional a la distancia recorrida sobre la zona no factible. La alternativa que se presenta en este trabajo es hacer uso del método de la burbuja, presentado en Runarsson & Yao [7] y fundamentado sobre la idea de sustituir la penalización incluida en la función de coste por una probabilidad de supervivencia de las soluciones no factibles, que permite a las soluciones no válidas permanecer, con una baja probabilidad, en las generaciones sucesivas. Esto hace que el algoritmo pueda explorar zonas del espacio de búsqueda no permitidas de otra forma.

También se ha analizado el trabajo de Hasircioglu, Topcuoglu et al. [8] que define trayectorias 3D de vehículos aéreos no tripulados mediante la interpolación con **B-Splines** (al igual que [1]) de los puntos de paso (WPs, way-points) optimizados por un algoritmo genético multi-objetivo. La idea más novedosa de ese trabajo es la determinación del coste de cada trayectoria y los coste entre dos WPs consecutivos, para poder determinar cuales son los peores tramos de los peores individuos de cada generación, y añadir WPs adicionales en dichos tramos. De esta forma ese trabajo introduce el concepto de codificación dinámica, en el que el número de variables de decisión no es constante para toda la población si no que se adapta para lograr un mayor grado de detalle en las zonas conflictivas del espacio de búsqueda. Este TFM también utilizará una codificación dinámica con un número de WPs variables.

Finalmente, para evaluar sistemáticamente las soluciones que se obtienen del algoritmo desarrollado en este trabajo, también se ha estudiado el trabajo de Besada-Portas, et al en el que se proponen diferentes procedimientos de caracterización de planificadores bioinspirados para vehículos aéreos no tripulados [13].

### 1.3. Motivación

Aunque en el apartado anterior ya se han mencionado brevemente las ideas que han dado pie a la realización de este trabajo, se hará hincapié ahora en los motivos que hacen especialmente interesante, desde un punto de vista práctico, la existencia de un planificador de trayectorias de buques como el que se propone en este TFM.

En efecto, el hecho de que las consecuencias del calentamiento global sean cada vez más visibles, y en concreto el deshielo progresivo de la banquisa ártica, ha abierto la posibilidad comercial de que los buques utilicen dos pasos árticos: el del Noroeste (atravesando los archipiélagos canadienses desde el Mar del Labrador hasta el Estrecho de Bering) y el del Noreste (desde el Mar del Norte hasta este mismo estrecho, recorriendo hacia el Este en este sentido las costas árticas de Siberia). Las previsiones actuales hablan de que en 2040 ambas rutas serán plenamente operativas durante al menos 2-3 meses al año.

La primera de estas rutas, que ha dado lugar a importantes expediciones de exploración desde mediados del Siglo XIX (potenciadas fundamentalmente por el Imperio Británico para conectar el Reino Unido con China), puede estar totalmente abierta hoy en día (y no todos los años) durante sólo unas pocas semanas. Esto es debido a que el elevado número de islas que existen en el Archipiélago Canadiense ( algunas de ellas de pequeño tamaño) y al hecho de que en estas longitudes del globo, la tierra continental se extiende hasta latitudes muy septentrionales<sup>2</sup> hacen que en veranos frescos el hielo no consiga derretirse suficientemente como para abrir un paso seguro para la navegación. Aún así, la navegación segura de los buques puede garantizarse habitualmente durante unas semanas mediante el acompañamiento de los buques de carga por parte de barcos rompehielos que abren pasos momentáneos. A modo de ejemplo, la siguiente figura muestra las tres sub-trayectorias posibles principales durante los meses de septiembre y octubre, siendo la más probable de estar libre de hielo (pero no la más corta) la más meridional.

Respecto a la ruta del Noreste es más probable encontrarla abierta, por los motivos ya mencionados anteriormente, durante un mayor número de semanas al año. Además cuenta con el apoyo de una flota permanente de buques rompehielos, algunos de ellos de propulsión atómica, financiados en parte por el Gobierno de Rusia, especialmente interesado en la normalización de esta alternativa comercial, con el objetivo primario de desarrollar una potente infraestructura portuaria y de transportes en una zona recóndita y abandonada de su inmenso territorio. Existe también un objetivo secundario para este

---

<sup>2</sup> En la zona canadiense la tierra firme alcanza hasta los 83° N aproximadamente, mientras que en Siberia no se sobrepasan los 77° N salvo un pequeño número de islas alejadas de la costa.

apoyo de las autoridades rusas: el reciente descubrimiento de ingentes reservas de petróleo y gas natural que existen bajo las aguas del Ártico<sup>3</sup>.



**Figura 1** Esquema con las 3 posibles alternativas en el Paso del Noroeste para años de especial acortamiento del Hielo Ártico durante el final del verano

A pesar de que fomentar este tipo de alternativas puede resultar negativo para el medio ambiente, se da la paradójica circunstancia de que comenzar a explotar estas rutas reduciría de forma muy considerable el consumo de combustibles fósiles por parte de los buques portacontenedores, donde aún queda mucho tiempo para que alternativas de propulsión híbridas, más verdes, vayan tomando fuerza como posibilidad real. De hecho, el sector de la marina mercante es responsable de un 2.5-3% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> (según datos de la Organización Marítima Internacional -OMI-, disponibles en [9]), con lo que reducciones del orden del 40% en ciertas rutas relativamente habituales entre puertos septentrionales del hemisferio norte podrían contribuir de forma no despreciable a la reducción de la huella de carbono asociada al sector.

Por otra parte, existe otra importante ventaja inherente a los planificadores que, como en el que se presenta en este TFM, tienen en cuenta las condiciones climatológicas reinantes en las zonas que atravesará el buque a lo largo de sus trayectorias. Gracias a la extensa cobertura de satélites y a la gran precisión de los modelos numéricos de simulación usados por las agencias de meteorología hoy en día, es posible predecir cómo evolucionarán ciertas variables meteorológicas durante el tiempo que dura una travesía marítima media. Incorporando dicha evolución en la evaluación de posibles trayectorias del buque, el planificador de trayectorias puede obtener trayectorias válidas para las condiciones meteorológicas previstas y determinar, entre dos trayectorias de longitud similar, cual es la más adecuada. Concretamente, el planificador de este TFM considera la influencia de la evolución de la intensidad y dirección del oleaje en la

---

<sup>3</sup> Añadir que la soberanía de estas reservas está siendo objeto de fuertes debates, con las consecuentes tensiones geopolíticas, y que su posible explotación ha suscitado la indignación de ONGs ecologistas como Greenpeace. En cualquier caso, es obvio que el desarrollo durante los años venideros de una buena infraestructura colocaría a Rusia en una situación ventajosa de cara a una hipotética carrera petrolífera, que se produciría más adelante, en el momento en el que la extracción de las actuales reservas petrolíferas de Oriente Medio comience a resultar demasiado costosa.

velocidad y consumo del buque<sup>4</sup>. Como ejemplo claro de las ventajas que aporta incluir las condiciones meteorológicas en el planificador cabe citar la adversa climatología, con intenso oleaje, que suele reinar en las cercanías del Cabo de Hornos (que separa el Pacífico del Atlántico Sur), en cuyas aguas se han producido muchos naufragios y que, aparte del evidente ahorro en distancia total, justificó en parte la construcción del Canal de Panamá (en servicio desde 1914).

También es importante destacar que aunque el presente trabajo sólo aborda la optimización de trayectorias individuales (de un buque) y no la de conjuntos de flotas (p.e. los buques perteneciente a una cierta naviera), esta aproximación constituye un primer paso imprescindible para dar el siguiente (por ejemplo, mediante una optimización multi-objetivo). Por lo tanto, su desarrollo está enfocado a resolver el gran problema de saturación<sup>5</sup> que, al igual que sucede ya hoy en día con el tráfico aéreo, tendrá en un futuro cercano el tráfico marítimo mundial. Además, versiones avanzadas de este tipo de planificadores podrá prevenir conflictos marítimos (como los abordados en [4]), evitar paradas de la marcha y fondeos innecesarios (con el consiguiente derroche económico asociado a la puesta en marcha de los motores y al hecho de tener paradas a las tripulaciones), modificar la velocidad de los buques (de forma preventiva, para que los buques organicen el paso de los estrechos ajustando sus velocidades), etc.

## 1.4. Objetivos

A continuación se detallarán los objetivos concretos y las especificaciones requeridas al planificador de trayectorias de buques de este TFM, así como para la validación de los resultados de simulación obtenidos con el mismo durante su puesta a punto.

En primer lugar, **el planificador debe devolver trayectorias factibles, físicamente realizables por el buque**. Aunque parezca un objetivo obvio, se hace hincapié especial en esta idea en esta sección por los dos motivos siguientes:

- El hecho de que los contornos de costa y hielo, cuya penetración siempre se debe evitar en la generación de las trayectorias, sean curvas complejas (con multitud de quiebras y formas en general enrevesadas) convierte al problema matemático en cuestión en uno con numerosas regiones no factibles, en el que los operadores clásicos de los algoritmos evolutivos pueden quedar fácilmente atrapados. Por ese motivo, puede ser conveniente hacer modificaciones "ad hoc" en algunos operadores concretos del GA (por ejemplo en la función de mutación), o incorporar etapas adicionales, no necesariamente evolutivas y deterministas (como el ya mencionado algoritmo A\*) que favorezcan la generación de trayectorias que, aunque no sean necesariamente óptimas, al menos garanticen su cercanía al espacio factible de búsqueda.

---

<sup>4</sup> Aunque no se consideren otras variables meteorológicas de momento, sería relativamente sencillo incluir otras que permitiesen, por ejemplo, hacer que los buques evitase durante la trayectoria zonas grandes borrascas (de tipo huracán).

<sup>5</sup> Este problema de saturación se pone de manifiesto especialmente en estrechos de elevado tráfico y escasa profundidad, como el de Malaca [14]

- La pequeña anchura de los dos canales considerados en los escenarios de prueba (en comparación con el tamaño característico entre puntos de corte del conjunto de datos geográfico) y el grado de resolución de las trayectorias, dificulta, desde un punto de vista de parametrización y planificación de trayectorias, el asegurar un paso seguro (sin choques) por dichos canales (cuando así lo recomiendan los algoritmos).

Otro objetivo fundamental de este trabajo, y del que depende el futuro uso del planificador que se desarrolle en un entorno real, es utilizar modelos realistas y de cierta complejidad del entorno. Por lo tanto, las bases de datos necesarias, tanto geográficas como meteorológicas, deberán ser obtenidas de fuentes fiables, habiéndose obtenido de servidores web del Gobierno Estadounidense, entre las que están la “National Oceanic and Atmospheric Administration” (**NOAA**), donde se encuentran los datos de las formas de las costas (en el *Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database (GSHHG)*) y los datos históricos de oleaje, y el "National Snow & Ice Data Center" (NSIDC), donde se recogen la cobertura del hielo en el ártico.

Otros objetivos destacables son:

- La construcción de un planificador, soportado por técnicas evolutivas, que incorpore los modelos previamente mencionados para determinar rutas de buques entre dos puertos dados.
- La evaluación sistemática del planificador desarrollado, de forma estadística, sobre diferentes escenarios (entre diferentes puertos, en diferentes épocas del año, etc).

## 1.5. Organización de la memoria

A continuación se presenta la estructura que tendrá el presente trabajo, que contará, aparte de este primer capítulo de Introducción General:

Con un Capítulo 2 en el que se hará una descripción detallada de las fuentes científicas y los modelos externos de datos que se han utilizado para construir el entorno matemático con el que se va a resolver el presente problema de optimización, y en el que se presentarán todos los términos y contribuciones de la función de mérito (escalar, por tanto se definirá el problema como el de una optimización mono-objetivo) que se utilizará para determinar la bondad de cada trayectoria. Además, en este capítulo también se pondrá de manifiesto el esfuerzo realizado y las funciones desarrolladas (complementarias a la Toolbox Geográfica de Matlab) para compatibilizar los datos de modelos los geográficos de costas y del hielo ártico

Con un Capítulo 3 en el que se detallarán los distintos algoritmos, y operadores matemáticos y geométricos en los que se sustenta esta optimización, Los principales elementos son, como ya se ha mencionado anteriormente, un Algoritmo de Optimización Genético que da soporte general al planificador y el algoritmo A-Estrella usado, tras una discretización del espacio de superficie esférica en un grid rectangular, para generar el conjunto de trayectorias que constituyen la población inicial del AG.

También se describirán en detalle todos los operadores específicos que se han incluido en ambos algoritmos, y se discutirán las ideas planteadas para optimizar el efecto positivo en la convergencia de los términos de penalización de la función de coste (en este caso, se trata claramente del hecho de atravesar zonas prohibidas de continente y/o hielo). Además, este capítulo incluye un repaso, a modo de resumen, del estado del arte de diferentes algoritmos de optimización en otros planificadores de trayectorias actuales.

Con un Capítulo 4 que presenta los resultados de las distintas optimizaciones, en cuyo espectro se cubrirá un conjunto aleatorio lo suficientemente poblado de parejas de puertos de tal forma que el resultado de la evaluación del funcionamiento del algoritmo no se vea sesgado por el hecho de privilegiar ciertas trayectorias (como por ejemplo las que incluyen una alternativa factible polar) frente a otras. Este apartado incluirá también la necesaria caracterización estadística, que permitirá evaluar lo adecuado de las características de convergencia de las soluciones hacia una solución que sea al menos factible, así como un optimización paramétrica en relación con los distintos grados de libertad que existen en un GA genérico.

Con un Capítulo 5 que recoge una conclusión general sobre lo adecuado de los resultados obtenidos con la técnica desarrollada a lo largo de este TFM, así como posibles futuras mejoras para solventar las deficiencias que se detecten en esta fase.

## Capítulo 2: Descripción y Modelo del Problema

En este capítulo se describirán, en una primera sección, las características matemáticas del problema, desde el punto de vista de coordenadas de trabajo, parametrización de las soluciones, rigidez de los formatos de las mismas, así como adaptaciones de las mismas que las distintas partes del algoritmo puedan requerir. Se continuará con una segunda sección en la que se hablará con más detalle de las fuentes de información del problema que han permitido obtener los distintos datos, y darles un formato común para poder usarlos en conjunto. Se hablará aquí también de los grados de complejidad y precisión disponibles en estas fuentes de información, y con cuales se ha decidido trabajar para poder realizar un trabajo abordable. Por último, en la tercera sección, se formularán los distintos términos de la función de mérito, que es escalar e incluye un término de penalización para escapar de las zonas de restricción.

### 2.1. Variables de Decisión y Parametrización de Soluciones

Consideramos que el problema de optimización de la trayectoria de un buque que nos ocupa está limitado por los dos puntos fijos extremos de la misma (el primero y el último según el sentido de recorrido) y por una fecha de partida (también predeterminada de antemano). Además, las únicas variables de decisión que debemos optimizar son las parejas de valores (longitud y latitud, teniendo en cuenta que se trata de un problema 2-D ya que la altura del buque queda definida por la superficie del mar) de los puntos de paso intermedios utilizados para codificar la trayectoria. Además, la velocidad del buque en cada uno de esos puntos será definida de forma determinista, en función de su cercanía al hielo ártico y del oleaje (intensidad, altura y dirección) en cada punto de la trayectoria. También es importante destacar que el número de puntos intermedios de cada trayectoria (y el número de puntos con valores prefijados) es variable, y se encuentra determinado por el comportamiento del A-Estrella utilizado durante la etapa de inicialización y por los operadores incorporados en el GA.

Para explicar cómo se determinan el número de puntos intermedios iniciales, conviene mencionar que el algoritmo clásico de la robótica (A\*) es utilizado, antes de ejecutar el algoritmo evolutivo (GA), para obtener una o dos (también se aclarará más adelante en función de qué se determina este número) soluciones preliminares *factibles* con un nivel de resolución de datos geográficos menor que el que se tendrá en la ejecución del GA.

Además, el algoritmo A\* utiliza como entrada una geometría plana rectangular, obtenidos a partir de la geometría esférica de partida (los datos geográficos, como también se verá más adelante, están referidos al elipsoide WGS-84) y formada por un grid homogéneo que, por motivos de abordable computacional, se ha fijado en 1080

celdas<sup>6</sup> para la coordenada equivalente a la longitud (una vez "proyectado" al plano), y 540 para la equivalente a la latitud. El estar obligados a trabajar en cartesianas implica una pérdida de precisión respecto a los datos originales, que repercute en el hecho de que las distancias mínimas (A\* busca trayectorias de mínima distancia que respeten obstáculos, que en este caso son los continentes y hielo) en cartesianas no lo son en general para el espacio esférico en el que se pretende obtener la solución óptima final. Adicionalmente, el obtener una trayectoria entre dos puntos datos (asociados el puerto de origen y al de destino) sobre un grid con obstáculos implica que el número de puntos que tiene la *curva única* devuelta por A\* es variable, habida cuenta de que cada salto en el grid (de un punto del espacio sólo se puede pasar a las 8 cuadrículas adyacentes) constituye un punto intermedio de la trayectoria. A modo de ejemplo, en la Figura 2, se muestra la trayectoria (en azul) obtenida con el algoritmo A\* sobre un grid pequeño, en el que los obstáculos se muestran con círculos rojos.

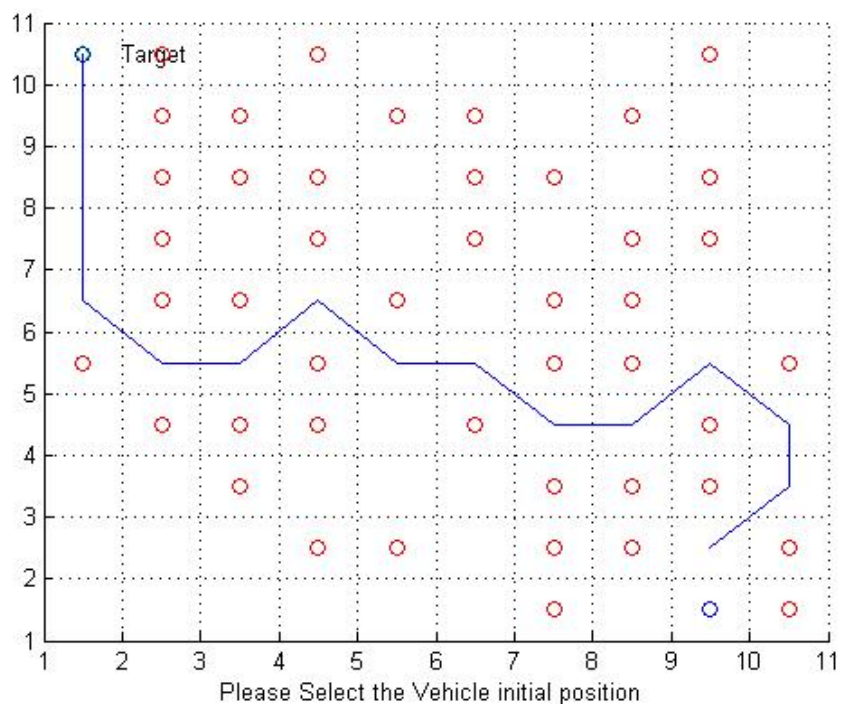


Figura 2: Ejemplo sencillo de solución obtenida con A-estrella para una cuadrícula pequeña

Por tanto, en la población inicial del GA que obtendrá la solución del problema, habrá individuos generados a partir de la solución proporcionada por el algoritmo A\*, y éstas tendrán el número de puntos intermedios necesarios para esquivar los obstáculos y llegar del puerto inicial al final.

Además, es importante resaltar que el planificador está programado de tal manera que antes de llamar al AG, el algoritmo A\* se puede ejecutar dos veces: una teniendo en cuenta entre los obstáculos al hielo polar y otra sin él. A continuación ambas soluciones

<sup>6</sup> El número de celdas en cada sentido se ha elegido intentando alcanzar un compromiso entre la resolución de la celda (cada cuadrado del grid rectangular tiene unos 74 km de ancho en el sentido de la latitud, y unos 12.5 km de largo en el sentido de la longitud) y el tiempo de cómputo del algoritmo A\*.

son utilizadas como base de la población inicial, motivo por el que no todos los individuos de dicha población tendrán el mismo número de puntos intermedios.

El motivo por el que se ejecuta una segunda vez el algoritmo A\* es el siguiente: se quiere garantizar que, en caso de que el resquicio real que existe entre el hielo ártico y el continente (o alguna de las islas del Archipiélago Canadiense) es considerado inexistente por el enrejado del grid del algoritmo A\* y suficiente por el GA (que trabajará con una precisión superior) para permitir al buque aprovechar el Paso del Noroeste (PNW por sus siglas en inglés), el algoritmo GA disponga de una solución que, una vez manipulada correctamente, puede aprovechar el paso existente. A modo de ejemplo de la problemática anterior, en la Figura 3 se marcan dos puntos (separados una distancia de 33km) en los que se puede ver como la resolución del grid es insuficiente (con celdas de 74x12.5 km<sup>2</sup>) para captar el detalle del hielo.

Además, dado que la doble llamada al algoritmo A\* tiene un coste computacional muy alto (debido al elevado número de celdas que impone la resolución de un problema de estas características) es conveniente evitar en la medida de lo posible realizar la segunda ejecución del algoritmo A\*. Por lo tanto, se ha decidido realizarla en la práctica solo cuando el puerto de origen y el de destino estén en el hemisferio norte. Se considera pues que si al menos uno de ellos está en el hemisferio sur, es muy difícil conseguir una disminución de la distancia (principal componente de la función de coste) en la trayectoria que pasa por las zonas árticas, respecto a alternativas clásicas como las rutas que aprovechan los Canales de Panamá o Suez.

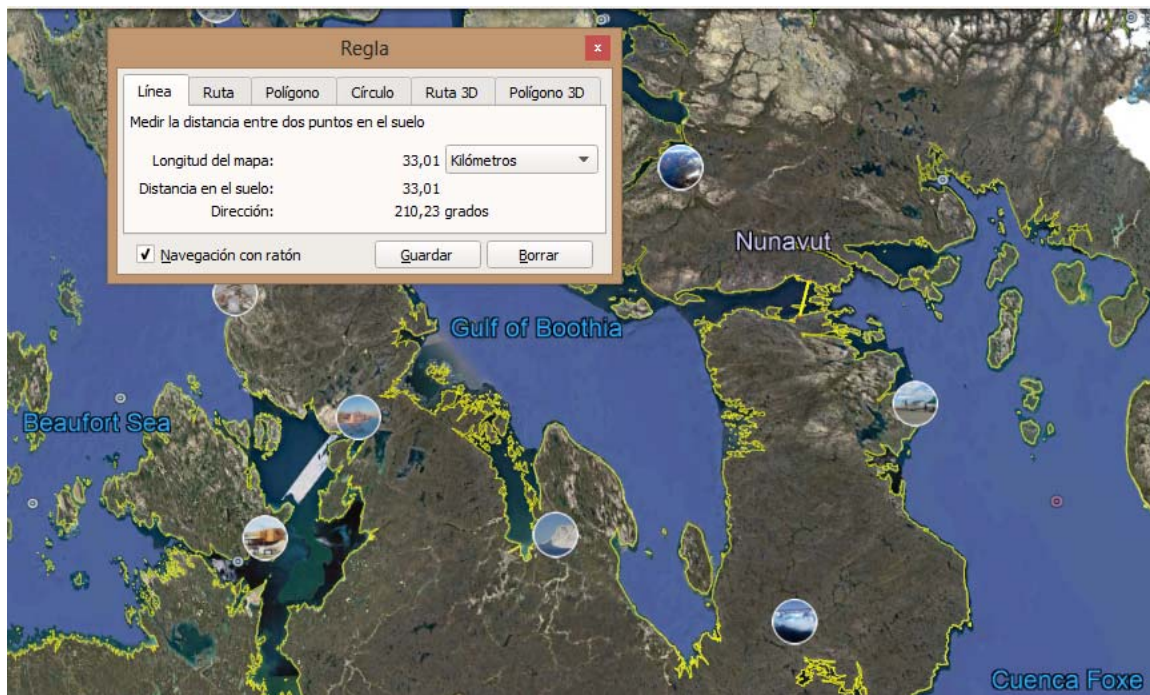


Figura 3 Detalle del tamaño característico de los pasos más estrechos atravesados en rutas clásicas del PNW

Una vez expuesto el método utilizado para generar las trayectorias iniciales<sup>7</sup> merece la pena detenerse algo de tiempo en considerar si, entre todos estos puntos de las trayectorias deterministas iniciales, conviene fijar los valores de algunos antes de que los mecanismos de aleatoriedad y evolución del GA manipulen los valores de los restantes puntos. A este respecto, la decisión que se ha tomado es definir un número moderado, creciente con el número de puntos (por tanto con la longitud) de la trayectoria obtenida por el A\*, y limitado (igual o inferior a un número entre 10 y 20 que será un parámetro de entrada al GA) de puntos fijos intermedios (WP, Way-Points), eligiéndose estos como aquellos en los que la distancia a las zonas prohibidas del espacio de optimización (continentes y hielo) sea mínima.

El motivo de esta decisión (que hace que la evolución de las trayectorias "pivote" alrededor de los puntos intermedios prefijados) obedece sobre todo a dos razones. En primer lugar, parece lógico que si se da la libertad de mover los puntos que están muy cerca de las zonas no factibles, aumenta la posibilidad de entrar en las mismas, convirtiéndolas en irrealizables, o aumentando el grado de irrealizabilidad de las trayectorias. Con respecto a este extremo, cabe destacar el peligro de que estos WP, que sólo dependen del resultado obtenido por el A\* caigan dentro del contorno continental, con lo que se estaría fijando un punto de la trayectoria sobre una zona restringida. En la práctica, se ha comprobado mediante muchas ejecuciones del algoritmo, que esto sólo ocurre en las trayectorias que atraviesan los canales de Suez o Panamá. Para evitar el problema se ha incluido una funcionalidad muy adaptada a la forma precisa de los mismos para obligar, en la función de generación del GA, a que cuando la trayectoria tiene que pasar por ellos, se restrinja la "libertad" entre los WPs adyacentes al canal, asegurando la ausencia de choques mientras el buque los atraviesa en su zona más estrecha. La segunda razón es que, por la cuestión ya descrita de que el algoritmo A\* trabaja en cartesianas y por tanto pierde la realidad de las distancias en esféricas, los tramos de trayectoria en océano abierto tienden a no seguir ortodrómicas, sino a minimizar distancia de una forma similar a la mostrada en Figura 4. En ella se aprecia como en la trayectoria generada por el A\* entre los puertos de Armuelles (en la proximidad del Canal de Panamá) y Adén (Yemen)<sup>8</sup>, el tramo entre la Isla de la Española y el Estrecho de Gibraltar no es una ortodrómica (círculo máximo que minimiza la distancia sobre una esfera, en un tramo sin obstáculos en pleno océano), sino está formado por un tramo "diagonal" y otro de latitud constante. Por ello, toma especial interés de cara al GA, fijar dos puntos cercanos a las anteriores isla y estrecho, y permitir en su momento que los puntos intermedios sean ajustados libremente por el GA, para poder, entre otras posibilidades, evaluar estrategias alternativas para minimizar el recorrido entre WPs.

---

<sup>7</sup> Cabe mencionar también que el método de inicialización propuesto resulta más efectivo que el que se utilizó en el trabajo de la asignatura OHA y que ha sido el germen de este TFM, puesto que en ese caso la población inicial se generaba con ortodrómicas de mínima distancia entre los puertos de origen y destino, evitando las zonas prohibidas así atravesadas mediante un mecanismo adicional que hacía a los buques navegar paralelamente a la costa.

<sup>8</sup> Estos puertos de origen y destino también han sido utilizados como trayectoria-base para ajustar el código de generación del GA a un número de canales atravesados mayor que uno.

Además, existe una poderosa razón para considerar el uso de WPs fijos y que se encuentra relacionada con el operador de cruce del GA. El motivo es que para evitar discontinuidades en las trayectorias generadas mediante la unión de distintos tramos de las trayectorias de sus progenitores, es conveniente que todos los individuos de la población tengan puntos en común (en nuestro caso los WPs fijos).

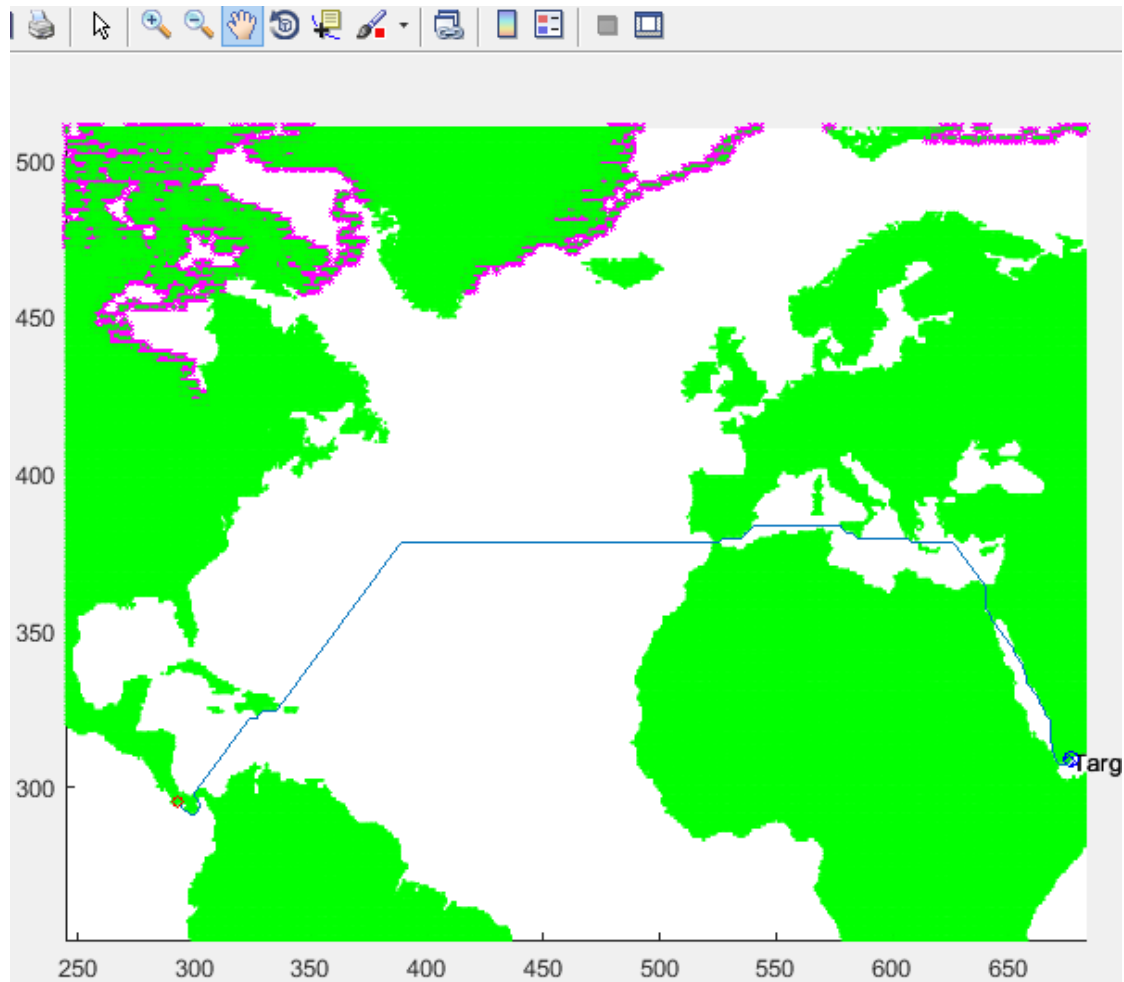


Figura 4 Ejemplo de salida del A\*, para la trayectoria P.Armuelles (Panamá)-Adén (Yemen)

## 2.2. Modelo Matemático, entradas y Fuentes de Restricciones

Una primera entrada necesaria para el planificador desarrollado en este TFM es un listado de puertos, con sus correspondientes longitud y latitud, entre los cuales se calcularán, pareja a pareja, las trayectorias óptimas. Estos puertos se han elegido por tres criterios: que sean preferiblemente puertos con importante flujo de carga y tráfico marítimo (para potenciar el enfoque de aplicabilidad comercial, véase [16], que su ubicación tenga especial interés para explorar ciertas rutas durante la optimización, y que abarquen una amplia diversidad geográfica de regiones y de mares (especialmente los interiores como son el Báltico o el Negro). Respecto a esto último, cobra especial interés el hecho de que abunden puertos del norte de Norteamérica y de Europa, así como del Asia Septentrional, cuya unión pueda con cierta garantía de éxito, realizarse por la alternativa ártica ya mencionada del NWP. En la siguiente tabla se muestran los 42 puertos elegidos, junto con sus coordenadas geográficas.

| Puerto                      | Latitud (°) | Longitud (°) |
|-----------------------------|-------------|--------------|
| Miami (EE.UU.)              | 25.75       | -79.4        |
| Vladivostok (Rusia)         | 43.1        | 131.75       |
| Valencia (España)           | 39.27       | 0.19         |
| Buenos Aires (Argentina)    | -35.2       | -56.9        |
| Estambul (Turquía)          | 41.01       | 29           |
| Glasgow (Reino Unido)       | 55.67       | -4.96        |
| Tokio (Japón)               | 35.52       | 139.92       |
| Nueva York (EE.UU.)         | 40.66       | -74.03       |
| Rotterdam (Holanda)         | 52          | 4.05         |
| Shanghai (RP China)         | 31.25       | 121.75       |
| Puerto Montt (Chile)        | -41.5       | -73.95       |
| Casablanca (Marruecos)      | 33.73       | -7.51        |
| Estocolmo (Suecia)          | 59.02       | 18.7         |
| Los Ángeles (EE.UU.)        | 33.72       | -118.23      |
| Bombay (India)              | 18.97       | 72.6         |
| Honolulu (Hawai, EE.UU.)    | 21.28       | -157.85      |
| Port Moresby (Papúa N.G.)   | -9.56       | 147.16       |
| Gijón (España)              | 43.57       | -5.68        |
| Antofagasta (Chile)         | -23.63      | -70.48       |
| Valparaíso (Chile)          | -33         | -71.75       |
| Massawa (Eritrea)           | 15.74       | 39.56        |
| Houston (EE.UU.)            | 29.17       | -94.75       |
| Sebastopol (Crimea, Rusia)  | 44.58       | 33.3         |
| Bangkok (Tailandia)         | 13.51       | 100.55       |
| Maracaibo (Venezuela)       | 11.15       | -71.48       |
| Santa Marta (Colombia)      | 11.26       | -74.23       |
| Atenas (Grecia)             | 37.8        | 23.69        |
| La Habana (Cuba)            | 23.13       | -82.35       |
| Algeciras (España)          | 35.95       | -5.42        |
| Sidney (Australia)          | -34         | 151.24       |
| Colombo (Ceilán, Sri Lanka) | 4.5         | 77           |
| Nápoles (Italia)            | 40.7        | 14.2         |
| Rio de Janeiro (Brasil)     | -23         | -43.1        |
| Monrovia (Liberia)          | 4           | -12.5        |
| Dubai (Emiratos Árabes)     | 25.29       | 55.26        |
| Adén (Yemen)                | 12.73       | 45           |
| Oslo (Noruega)              | 59          | 10.66        |
| Copenhague (Dinamarca)      | 56.1        | 12.57        |
| Ciudad del Cabo (Sudáfrica) | -34.5       | 18.45        |
| Singapur                    | 1.24        | 103.4        |
| Puerto Armuelles (Panamá)   | 8.2         | -82.82       |
| Busán (Corea del Sur)       | 35          | 129.1        |

**Tabla 1** Lista de Puertos usados como origen-destino de las optimizaciones

Una latitud positiva indica hemisferio Norte y una Longitud positiva indica Este medido desde Meridiano Greenwich. A continuación se describen, con algo más de detalle, y haciendo hincapié en la dificultad encontrada para su implementación y ajuste mutuo, las fuentes de información elegidas de costas, meteorología y hielo. Todas ellas

forman parte del modelo matemático del problema y se caracterizan por un alto grado de fiabilidad y precisión<sup>9</sup>.

### 2.2.1 Fuente de datos de contornos continentales

Se comenzará con el que la fuente que se considera más importante, la correspondiente a los **datos de contornos continentales geográficos** (y de las principales islas), sin los cuales no es posible delimitar las zonas del espacio de búsqueda que son realizables (océanos y mares) de las que no lo son en cualquier época del año y circunstancia meteorológica. Además, es necesario definir la posición relativa de los puertos anteriores respecto de los contornos de la base de datos, habiendo sido necesario, en algunos casos, mover éstos ligeramente debido a que la precisión del contorno usado indicaba que se encontraban ubicados sobre tierra firme.

Estos datos han sido obtenidos del servidor público *Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database (GSHHS)*, cortesía de los doctores Wessel de la Universidad de Hawaii y Smith del NOAA's Laboratory for Satellite Altimetry.. Este conjunto de datos forma parte del programa "World Vector Shorelines" (WVS)<sup>10</sup>, creado en 1995 para la planificación de operaciones militares y la realización de aplicaciones puramente cartográficas, y constituye la base de datos abierta de demarcación geográfica de costas más precisa disponible hoy en día.

Los datos se encuentran almacenados en ficheros de formato .shp (shape, forma en inglés), fácilmente manejables en Matlab mediante el comando 'shaperead' de la Toolbox de Mapas de dicho software de programación científica. La nomenclatura de este tipo de archivos (descrita con detalle en [17]) es `GSHHS_PRECISION_LEVEL.shp`, donde la PRECISION varía de mayor a menor y toma valores entre 'f', 'h', 'i', 'l', y 'c' (esta última corresponde al grado crude, grueso en inglés) y los NIVELES, con valores entre 'L1' y 'L6', corresponden al grado de anidamiento permitido (de fuera hacia dentro, partiendo de los océanos). Más en concreto, el nivel L1 corresponde a islas y continentes, el L2 a contornos interiores a lagos o mares interiores como el Caspio (es decir islas en lagos), L3 a los lagos contenidos en dichas islas, y así sucesivamente hasta el L6, que es una excepción y contiene datos de la Antártida del nivel jerárquico L1.

Para el planificador se ha usado la precisión más burda ('c') ya que en caso contrario el tiempo de computación, tanto del A\* como del GA, se ha demostrado inabordable. Además se ha comprobado que aumentar significativamente la precisión no ayudaba (sino más bien en todo caso tenía el efecto contrario) a salvar los problemas locales provocados por la fuerte no linealidad y alto grado de complejidad geométrica de los

---

<sup>9</sup> Cabe destacar que no es posible utilizarlas en el proceso de optimización actual con su grado más alto de precisión, ya que para ello se necesitaría una mayor potencia de cálculo (vía clusterización), o el uso de lenguajes precompilados del estilo C++.

<sup>10</sup> La familia WVS también contiene datos de batimetría (profundidad marina), que podrían haberse utilizado para penalizar el paso de buques de gran calado por zonas de baja profundidad. Esta opción no ha sido finalmente incluida en este TFM por ser en exceso ambiciosa computacionalmente y no aumentar significativamente la complejidad del problema.

contornos en ciertas áreas del planeta. Además, se utilizan los datos de los niveles L1 y L6, ya que son los que recogen información de las costas y de la Antártida.

La gestión de la carga matemática de estos contornos en entorno Matlab y su almacenamiento en una variable global (continentes) estructurada (cuyas dos principales componentes son la latitud 'Y' y la longitud 'X') se lleva a cabo en una función (carga\_contornos.m) que tiene un argumento de entrada para decidir si los contornos se muestran por pantalla (o no), y otro para indicar la fecha de comienzo de la trayectoria, que como se verá a continuación es necesaria para cargar los contornos de hielo adecuados.

### 2.2.2 Fuente de datos de contornos de hielo

Buena parte del interés de esta herramienta debería consistir en explorar la factibilidad y coste operativo de operar rutas polares. De ahí la importancia de la fuente de datos de la que se han obtenido los **alcances del hielo Ártico**<sup>11</sup> (con periodicidad diaria) , los cuales se encuentran disponibles en la agencia norteamericana "National Snow & Ice Data Center" (NSIDC), concretamente del servidor MASIE (Multisensor Analyzed Sea Ice Extent, con resolución espacial de hasta 1 km), que estima la cobertura de hielo principalmente mediante el análisis de datos de microondas recibidos por satélite. Al tener el mismo formato .shp que los datos de costas continentales y de islas, podrían ser cargados en variables del workspace de Matlab de forma similar a los datos de las costas.

Sin embargo, se ha encontrado una importante dificultad relacionada con el manejo de estos datos, en virtud de su compatibilidad con los de costas. Esto es debido a que mientras los datos de costa están asociados directamente a longitudes (coordinada 'X') y latitudes (coordinada 'Y'), los datos de hielo contienen información relativa a una proyección estereográfica polar. Por lo tanto, los primeros se pueden representar de forma sencilla mediante un comando de la Toolbox de Mapas (geoshow), utilizando cualquier proyección plana (en este TFM se usará siempre la Mercator, por presentar escasa distorsión en latitudes medias), mientras que los segundos deberán convertirse al formato de los primeros.

Concretamente, las coordenadas que incluyen los datos de hielo son distancias en metros medidas desde el polo norte a lo largo de los meridianos, y en dirección a los paralelos medidos respecto de un meridiano de referencia que es el 80° Oeste. Según la documentación oficial que sirve como guía de uso de estos datos ([18]), el paralelo estándar, en el que no existe localmente distorsión en distancias y áreas (la estereográfica conserva ángulos), es el 60°N aunque en la práctica, para el ajuste fino y puramente gráfico de los datos entre costas hielo se ha debido usar un valor de 57.6° N como entrada directa a la transformación de proyecciones. Las ecuaciones para pasar de esta proyección estereográfica polar (un ejemplo cualquiera se muestra en la Fig.5) a puntos latitud-longitud se han obtenido de la página 162 del compendio [19].

---

<sup>11</sup> Se prescinde del hielo Antártico porque, por una parte, se obtienen menos datos de él (al ser sobrevolados por un número inferior de satélites, que son los responsables de medir la radiación microondas de los que se obtienen) y por la otra, hay un número inferior de trayectorias comerciales que se aproximan a dichos extremos meridionales.

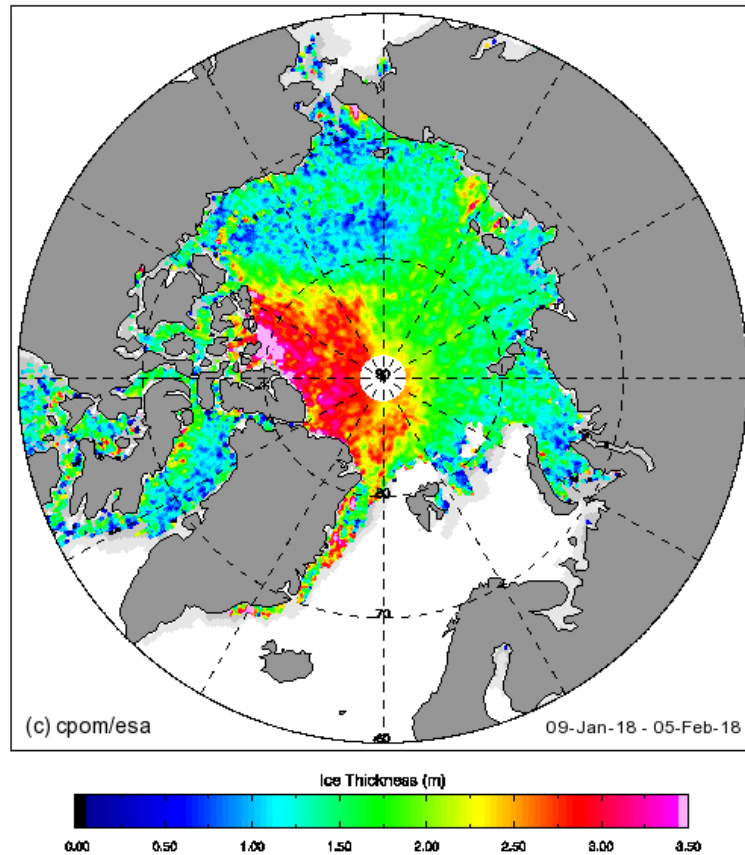


Figura 5 Ejemplo de proyección estereográfica polar

Es importante destacar que en un primer lugar se intentó evitar implementar dicha función (llamada `north2LonLatEllipsFast`), mediante el uso de comandos propios de la toolbox cartográfica de Matlab (concretamente `enu2geodetic`), pero no sólo los resultados no fueron adecuados (existía un desajuste en latitud que impedía el uso práctico de los datos, pues echaba por tierra la posibilidad de explorar estrechos canales entre hielo y costa), sino que además el tiempo de computación era mucho más elevado. El ahorro computacional de la función implementada se ha logrado mediante la aproximación numérica (que se ha comprobado que es muy precisa) que se presenta en las ecuaciones 3-5 de la página 162 de [19].

Una vez hecha esta transformación, los datos de costas y del hielo se pueden comparar y representar cartográficamente en un mismo mapa, lo cual permite vislumbrar las primeras posibilidades gráficas de la aplicación presentada en este TFM. Por ejemplo en la Figura 6 se representa un detalle de la zona del Ártico Canadiense, con el contorno costero en azul, el hielo correspondiente al 23-Sep-2017 en magenta y el hielo del 21-Mar-2017 en verde. En la figura se puede observar el perfecto solape entre el alcance del hielo y los contornos continentales contra los que "choca".

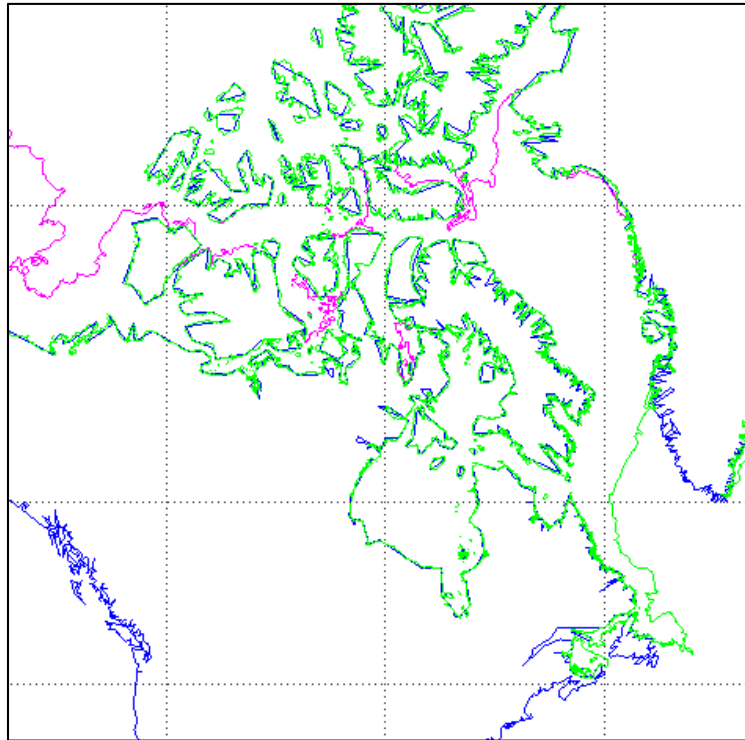


Figura 6 Detalle de la zona del Ártico Canadiense con extensiones máxima y mínima anual del hielo

Prescindiendo ahora del hielo de Marzo (cercano a su máxima extensión anual), en la Figura 7 se presentan únicamente el contorno de costas y los datos de hielo en septiembre, en una área de interés más pequeña que en la Figura 6, con el objeto de poner de manifiesto el estrechísimo pero abordable Paso del Noroeste, cuya factibilidad operacional (curva de alto nivel en verde) es uno de los principales objetivos prácticos de este trabajo.

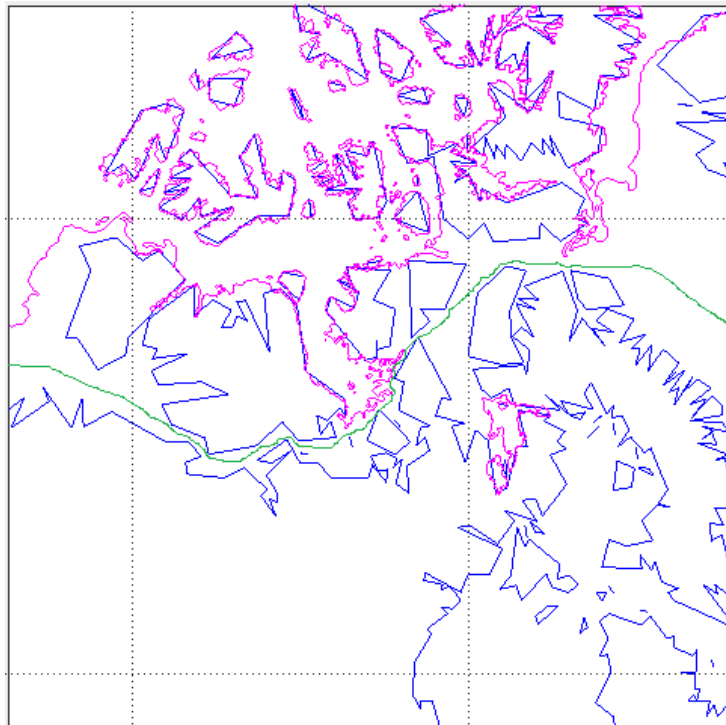


Figura 7 Ampliación de la zona de Fig. 2.5 en que se muestra el detalle de la habitual estrechez del NWP

Por su parte, la Fig. 8 se muestra el borde continental (y el hielo en Septiembre) del conjunto del planeta, por medio de la proyección de Mercator y sin los zooms utilizados en los dos casos anteriores.

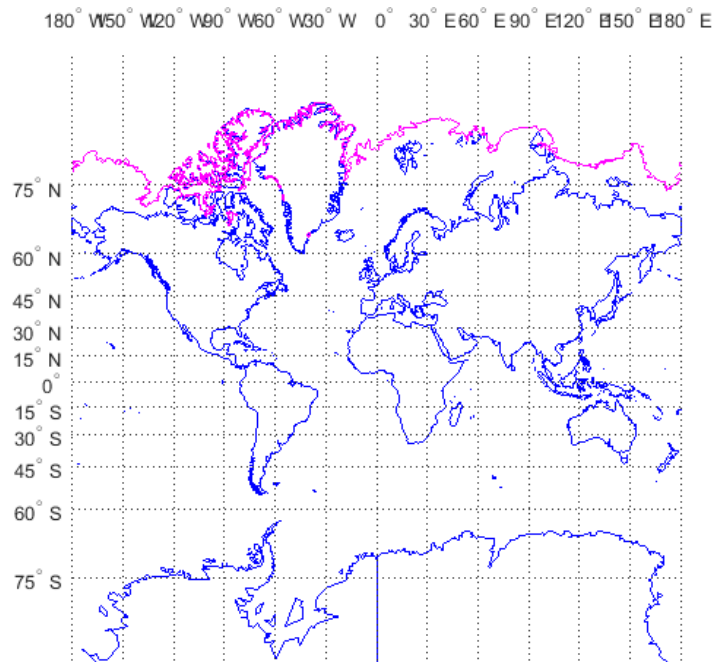


Figura 8 Proyección del Planeta con las islas consideradas y el hielo Ártico a 23-Sep-2017

En las imágenes obtenidas en las simulaciones realizadas en este TFM, se representará el hielo, por contraste con otros contornos, siempre en color magenta.

### 2.2.3 Fuente de datos meteorológicos

La última fuente de información utilizada para construir el modelo matemático de simulación es de otra índole, pues no constituye, tal y como ocurre con los modelos de costa y hielo, una restricción que determina si la trayectoria es o no factible, sino que más bien complementa la función de mérito con términos que la enriquecen. Se trata, como ya se ha adelantado en el Capítulo 1, de los **datos meteorológicos** obtenidos del modelo WAVEWATCH III del National Weather Service (NWS) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

A pesar de existir multitud de datos posibles (como por ejemplo predicciones de viento, temperatura del océano y de la atmósfera) se ha decidido que el más **relevante para un modelo de tráfico marítimo es el del oleaje**, importando en este caso tanto la velocidad del oleaje como su dirección y altitud. Para descargar los modelos se accede a ficheros '.grb2', que contienen en esencia datos globales de campo geográfico<sup>12</sup> a nivel del planeta (con 3 dimensiones: para 241 instantes de tiempo, 331 latitudes diferentes y 720 valores de longitud). Cada fichero corresponde a un mes completo del año en

<sup>12</sup> A diferencia de los espectrales, que contienen información en el dominio de la frecuencia asociada al oleaje, siendo los datos globales usados el resultado de integrar los espectrales.

cuestión y contiene el resultado de dos simulaciones numéricas de predicción con una resolución temporal de 3 horas, incluyendo como entrada de la simulación los datos de hielo y de vientos en superficie proveniente del modelo GDAS/GFS (Global Forecast System), con tiempos iniciales espaciados en intervalos de 15 días.

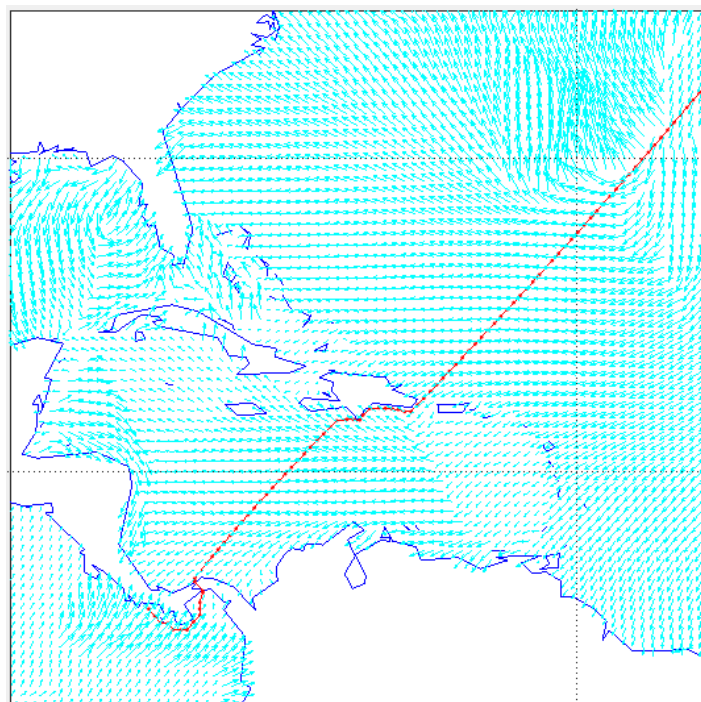
Una vez cargadas convenientemente las 3 variables integrales del oleaje disponible (período, altura y dirección), se obtienen la velocidad correspondiente al oleaje, en función de los datos cargados y una regla empírica, recogida en la Tabla 2, que da la longitud de onda del oleaje en función de la altura de la ola [20].

| Conditions necessary for a fully developed sea at given wind speeds, and the parameters of the resulting waves [hide] |                     |               |                  |                    |                                   |
|---|---------------------|---------------|------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Wind conditions   |                     |               | Wave size        |                    |                                   |
| Wind speed in one direction   | Fetch               | Wind duration | Average height   | Average wavelength | Average period and speed          |
| 19 km/h (12 mph)  | 19 km (12 mi)       | 2 hr          | 0.27 m (0.89 ft) | 8.5 m (28 ft)      | 3.0 sec, 10.2 km/h (9.3 ft/sec)   |
| 37 km/h (23 mph)  | 139 km (86 mi)      | 10 hr         | 1.5 m (4.9 ft)   | 33.8 m (111 ft)    | 5.7 sec, 21.4 km/h (19.5 ft/sec)  |
| 56 km/h (35 mph)  | 518 km (322 mi)     | 23 hr         | 4.1 m (13 ft)    | 76.5 m (251 ft)    | 8.6 sec, 32.0 km/h (29.2 ft/sec)  |
| 74 km/h (46 mph)  | 1,313 km (816 mi)   | 42 hr         | 8.5 m (28 ft)    | 136 m (446 ft)     | 11.4 sec, 42.9 km/h (39.1 ft/sec) |
| 92 km/h (57 mph)  | 2,627 km (1,632 mi) | 69 hr         | 14.8 m (49 ft)   | 212.2 m (696 ft)   | 14.3 sec, 53.4 km/h (48.7 ft/sec) |

**Tabla 2 Relación empírica entre altura y longitud de onda en condiciones de mar "Totalmente desarrollado"**

El concepto de mar totalmente desarrollado se refiere a un estado independiente del "Fetch", o distancia a lo largo de la cual sopla un viento constante sobre una masa de agua. Datos descargados de [4]

Para terminar con esta sección se muestra en la Figura 9 un ejemplo de trayectoria localizada sobre el Mar Caribe, y que es el resultado de alimentar a la función de generación del GA (que entre otras cosas consigue un paso fino por el Canal de Panamá) con la salida del algoritmo A-estrella, en presencia de un campo de oleaje como el que se acaba de describir.



**Figura 9 Ejemplo de trayectoria generada combinada con campo vectorial de oleaje**

## 2.3. Función de Mérito

Como ya se ha mencionado, se ha decidido formular este problema de optimización mediante una función de coste escalar (mono-objetivo), en cuyo cálculo intervienen distintas contribuciones físicas que se explicarán a continuación y un termino de penalización asociado a las restricciones.

Las principales contribuciones físicas a la función de mérito (implementadas en `coste_dyn_weather`) son las siguientes.

### 2.3.1 Consumo de combustible

Este término se calcula, en euros, como la integral a lo largo de la trayectoria, discretizada como un sumatorio de términos sobre cada uno de los puntos de paso intermedios que la definen, del producto del 'diferencial de trayectoria' evaluado como la distancia medida a lo largo de cada tramo entre los puntos que la parametrizan, y un consumo específico del tramo, medido en kg/km y calculado atendiendo a la potencia que habrá que suministrar a la planta propulsora del buque para navegar en cada condición (modulada por cercanía al hielo ártico, y la velocidad, dirección y altura del oleaje local en cada punto).

La siguiente ecuación muestra el valor del coste del fuel para el operador del buque, e incluye en el cálculo de  $c_e(x)$  la modulación con el oleaje en los casos en los que la dirección entre la trayectoria del buque y el oleaje local forman un ángulo mayor que un cierto umbral (establecido en  $50^\circ$ ) por encima del cual se considera que la excesiva perpendicularidad del oleaje<sup>13</sup> obliga a un esfuerzo de control importante<sup>14</sup>, requiere la continua correcciones de la trayectoria (con transitorios energéticamente poco eficientes), e introduce un efecto hidrodinámico directo<sup>15</sup> que hace crecer el consumo específico del motor frente a una velocidad (respecto al agua) constante.

$$\begin{aligned}
 \text{coste}_{fuel} &= \int_{x_{or}}^{x_{dest}} c_e(x) dx \\
 c_e(x) &= \begin{cases} c_0^{ice}(x) \cdot f_{\Delta c}^{DirW} \frac{\text{sen}(\theta_{tray}^{ww})}{\text{sen}50^\circ} & \text{si } (h_w(x) > h_w^{thr} \cap \theta_{tray}^w > 50^\circ) \\
 c_0^{ice}(x) & \text{caso contrario} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Además, en la expresión anterior  $h_w(x)$  representa la altura de la ola en la posición  $x$  de la trayectoria,  $h_w^{thr}$  es un umbral igual a 3m de altura por encima del cual se aumenta el consumo sin reducirse la velocidad,  $\theta_{tray}^w(x)$  es el ángulo formado ente la trayectoria y

<sup>13</sup> Sin que sea necesario que el valor del oleaje sea lo suficientemente elevado como para que se comprometa la seguridad de la navegación (y obligue por lo tanto a reducir la velocidad).

<sup>14</sup> Este esfuerzo es mayor cuanto más alta sea la ola ya que ésta tiene mayor energía.

<sup>15</sup> La deflexión permanente de timón de dirección, para mantener el rumbo deseado, aumenta la resistencia hidrodinámica.

la local del oleaje en la posición  $x$  de la trayectoria, y  $c_0^{ice}(x)$  es, el consumo específico asociado a cada tramo. Esta última función tiene el siguiente comportamiento:

- Por defecto, cuando la trayectoria no pasa por zonas árticas en proximidad de masas importantes de hielo, se considera que  $c_0^{ice}(x)$  toma un valor constante igual a unos 78 kg/km (para un buque portacontenedores de tamaño medio).
- Si la distancia mínima desde cada punto de la trayectoria  $x$  al hielo más cercano es menor que un umbral de 10 km, se aumenta el consumo específico en un 30%. Es importante resaltar que el cálculo riguroso de esa distancia mínima al hielo, podría ser un proceso muy lento si se realizase para cada punto de paso intermedio de la trayectoria (y éstas pueden llegar a tener más de 500 puntos). Por lo tanto, se sigue un método aproximado consistente en lanzar trayectorias de azimut constante desde dicho punto, equiespaciadas en  $15^\circ$  de azimut, y determinar el corte de cada una de esas direcciones con el hielo, para poder calcular a continuación la distancia mínima. Además, en esta zona de restricción "dura", la velocidad se reduce a un tercio de la velocidad de crucero nominal en zonas sin problemas meteorológicos, que es igual a 36.4 km/h (19.65 nudos). Esta reducción de velocidad afectará a otros costes operativos descritos en la siguiente sección.
- Si la distancia mínima al hielo está comprendida entre 40 y 110 km, el consumo se reduce de forma cúbica con la velocidad hasta el valor nominal, obteniendo dicha velocidad con una interpolación lineal entre el valor medio de referencia  $V_{med}$  (a 110 km) y  $V_{med}/3$  correspondiente a los 40 km. En el punto  $i$  de la trayectoria que entra en el rango anterior, se tiene:

$$\begin{cases} V_{frena}(i) = \frac{V_{med}}{3} + 2 \cdot \frac{V_{med} \cdot dist2ice(i) - DstVelMin}{3 \cdot DstVelMax - DstVelMin} \\ c_0^{ice}(i) = c_0 \left( 1 + \frac{2 \cdot (V_{frena}(i) - V_{med})^3}{3V_{med}^3} \right) \end{cases}$$

### 2.3.2 Penalización por restricción

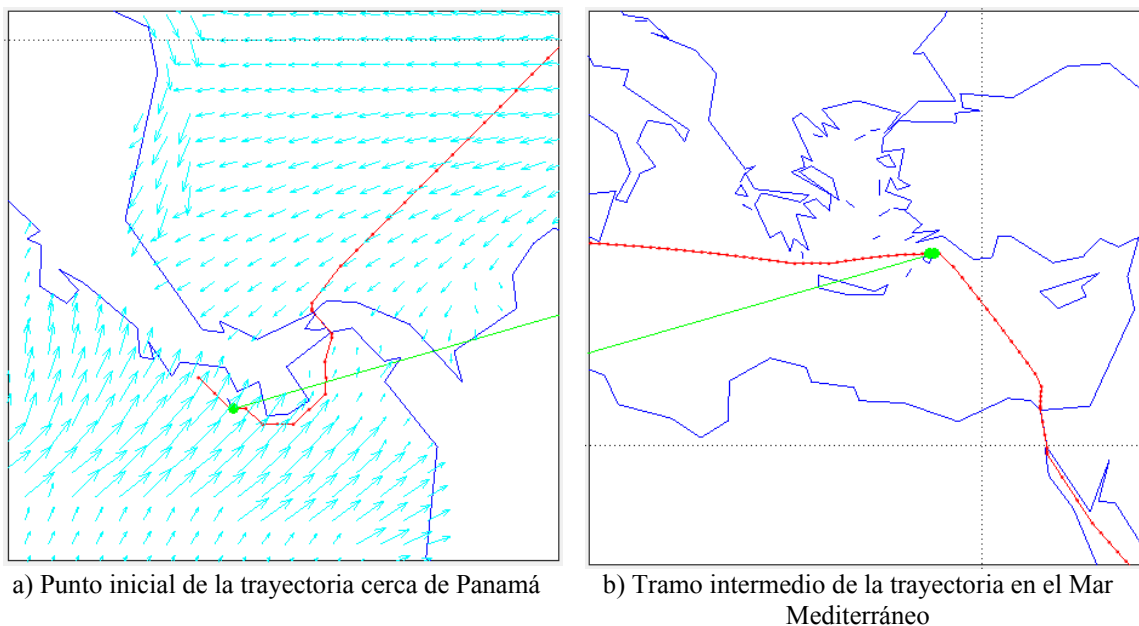
En este término se introduce un coste positivo de elevado valor, y constante con el número de generaciones, e igual a 1M€ por cada km atravesado por zonas restringidas, ya sea de continente como de hielo.

Para el cálculo de esta penalización, lo más importante es contar con una rutina eficiente y efectiva a la hora de calcular los cortes de una determinada trayectoria con los contornos de los continentes y el hielo. A tal efecto, se ha implementado una función (llamada `cortes_doug_flatearth_wrap`) que echa mano de una rutina descargada de la página oficial de MathWorks, elaborada por el profesor Douglas Schwarz de la Universidad de Rochester. Esta rutina permite que la línea de cambio Internacional de Fecha, en pleno Océano Pacífico y que constituye una singularidad matemática en longitud al pasar esta de  $-180$  a  $+180^\circ$ , no constituya un problema a la hora de conseguir la computación precisa de los puntos de corte de la trayectoria con las regiones prohibidas. En efecto, el uso combinado de los comandos `wrpTo360` (para normalizar el rango de longitudes de 0 a  $360^\circ$ ) y `flatearthtopoly` (para extender artificialmente la

trayectoria por los polos cuando esta atraviesa la línea de cambio de fecha), hacen que se puedan evaluar las trayectorias del Pacífico que atraviesan dicha línea.

Para tener en cuenta el hecho de que puede existir una importante diferencia entre la fecha de inicio de la travesía, y aquella en la que se atraviesan las regiones polares, teniendo que ser los datos de hielo usados mucho más cercanos a estos últimos, se calcula una fecha de paso por zona ártica equivalente. Se calculan los instantes de tiempo en que se cruza el paralelo 55°N, y se calcula el tiempo medio entre los correspondientes al primer y último corte. Esa será la fecha elegida para cargar el hielo real con el que se calcularán estos cortes.

Además, la función que calcula los cortes añade una serie de puntos verdes en las gráficas de las trayectorias (unidos por tramos rectos del mismo color para facilitar su rápida identificación) que determinan en qué puntos se han obtenido los cortes<sup>16</sup>. En la Figura 10 se pueden apreciar varios ejemplos de las entradas de la ruta en zonas prohibidas. En la gráfica de la izquierda, se observa el punto de partida de la trayectoria (en rojo), en las proximidades de Panamá, y una pareja de puntos de corte iniciales con una pequeña isla que no aparece dibujada. En la gráfica de la derecha se observa corte de la trayectoria con la costa de la Isla de Rodas, en el Dodecaneso griego y la recta verde que viene del corte anterior (desde la isla al sur de Panamá). Además, en la gráfica de la derecha no se representan los vectores asociados a la dirección y magnitud del oleaje, ya que en los Mares Mediterráneo y Negro no existe datos disponibles de oleajes (por ser sus valores en general despreciables respecto al oleaje existente en otros mares más abiertos del planeta).



**Figura 10** Ejemplo de visualización gráfica de los puntos de corte (en verde) de una trayectoria con las restricciones

<sup>16</sup> Nótese que el número de puntos de corte con zonas prohibidas siempre es par, debido a que los puertos de origen y destino de la trayectoria se encuentran, por construcción, siempre sobre el océano (aunque muy próximos a la costa).

### 2.3.3 Costes Operativos

Este coste se encuentra asociado a un coste proporcional al tiempo de travesía y depende directamente de los pagos de seguros y nóminas de tripulación. Se puede modelar, de forma sencilla, como 4880 \$/día si la trayectoria no pasa por latitudes árticas, y 7140 \$/día en caso contrario. Esto sucede, en la práctica, cuando se da simultáneamente que la trayectoria supera los 64° Norte y que la distancia al hielo es menor que el umbral anterior de 55 km.

### 2.3.4 Costes del rompehielos

Este coste es proporcional al número de kilómetros en los que el buque está en la zona de riesgo duro por hielo (es decir, que se encuentra a una distancia inferior de 10 km del hielo), y se encuentra asociado al coste de escolta de rompehielos. En este trabajo se modela con un coste orientativo de 86 \$/km.

### 2.3.5 Costes por Peajes

Son muy sencillos de modelar, ya que añaden un coste de 80000\$ si el buque pasa por el Canal de Panamá, y 150000\$ si lo hace por el de Suez.

### 2.3.6 Costes total

En la suma final de todos los costes, se hará la conversión pertinente de aquellos que se hayan encontrado en las fuentes de información en dólares, a euros, para así poder sumarlos y optimizar en una moneda determinada, para lo cual se usará un cambio actual de 1.16 dólares por euro.

$$Coste_{TOT} = peajes + coste_{fuel} + penal_{km}^{Restr} + \Delta Rompehielos + OperCost_{noIce} \cdot t_{end} + \Delta OperCost_{Ice} \cdot t_{ice} +$$

donde los tiempos t se expresan en días.

## Capítulo 3: Algoritmos Empleados

En esta sección se describirán en primer lugar de forma genérica los dos algoritmos que han servido de base a la implementación de este TFM, que son, como se ha comentado, el A-Estrella (para el cálculo determinista de una solución inicial relativamente cercana a la realizabilidad), y un Algoritmo Genético (cuya población inicial será generada a partir de las solución propuesta por A\*).

A continuación, se entrará en el detalle de sus implementaciones, de sus adaptaciones a las características específicas del problema a resolver, y por último de las modificaciones, puramente heurísticas, que se han introducido en los operadores del GA respecto a sus versiones canónicas.

### 3.1. Generalidades

En esta sección se describirá, sin entrar en demasiado grado de detalle, la teoría que sustenta los principales algoritmos y mecanismos empleados en el problema de optimización planteado en el TFM. Asimismo, se anticiparán de forma breve todas aquellas modificaciones o salvedades que será necesario introducir en dichas teorías para adaptarlas al problema en cuestión, dejando la descripción de las mismas para la sección 3.2.

#### 3.1.1 Algoritmo A-Estrella

Como ya se ha anticipado en capítulos anteriores, una de las principales dificultades encontradas en el trabajo de la asignatura OHA de este máster, que sirvió de germen al desarrollo de este TFM, fue precisamente el hecho de que la población inicial con la que se alimentaba al algoritmo evolutivo (y también a la técnica de búsqueda local aplicada), se generaba por procedimientos automáticos poco elaborados y escasamente heurísticos, que tendían a hacerlas caer en zonas del espacio de búsqueda muy alejadas del óptimo, por lo que los mecanismos posteriores del GA aplicado tenían muy difícil encontrar dicho óptimo.

Esto ocurría porque, en esencia, el método empleado para generar la población inicial constaba de dos etapas: en la primera se calculaba la curva de mínima distancia entre ambos puertos (que generalmente atravesaría una amplia zona de restricción) y en la segunda se modificaba la trayectoria, mediante un método geométrico bastante complejo, para que el buque, navegando en paralelo a la costa tendiese a bordear el obstáculo que separaba al buque del punto objetivo. Sin embargo, esta técnica solo resultaba exitosa cuando el obstáculo no era demasiado grande y no aparecían nuevos obstáculos mientras se intentaba sortear al primero.

Por ello, en algunas de las trayectorias optimizadas entonces, se siguió la técnica de introducir una serie de way-points fijos de forma puramente manual y enlazar las trayectorias entre ellos siguiendo el procedimiento anterior. Este método manual requiere de un cierto conocimiento del problema por parte del usuario, por lo que para automatizar esta parte del proceso se decidió realizar una búsqueda de técnicas clásicas de planificación de trayectorias que eviten obstáculos. Entre los algoritmos encontrados destacan dos, mencionadas en los Capítulos anteriores: el algoritmo A-Estrella y el de Dijkstra.

Se ha decidido usar el primero, clásico en la búsqueda en teoría de grafos, por lo que a continuación se detalla su sencillo funcionamiento, aunque muy útil dado que siempre garantiza la obtención de una solución (siempre y cuando ésta existe). Está basado en la idea de moverse, en cada paso de iteración a lo largo y ancho de la cuadrícula, desde el punto presente a aquel en el que se minimiza la distancia (coste en general) al objetivo final.

Más en concreto, en cada paso iterativo  $i$ , los 8 posibles sucesores de la cuadrícula analizada son evaluados, calculándose su coste como la suma del coste (distancia euclídea) correspondiente a moverse desde el nodo origen, pasando por los puntos ya guardados, a cada candidato en  $i$  ( $h(i)$ ) y el coste de moverse desde el candidato en cuestión al destino final ( $g(i)$ ).

La función de mérito es pues, en cada paso, para cada una de las 8 posibilidades de avance a una cuadrícula aneja, igual a:  $f(i) = g(i)+h(i)$ . La forma de calcular las distancias inicial entre dos nodos, dada una norma (en este TFM se usará una aproximación consistente en proyectar latitud y longitud como si fuesen cartesianas), es simplemente evaluar la longitud de la línea recta entre ellos.. A continuación, y a medida que se van evaluando puntos de la cuadrícula, se generan dos listas: una llamada OPEN y otra CLOSED. En esta última se introducen todos los puntos obstáculo, así como los puntos de trayectorias que ya se han evaluado en el proceso iterativo.

La base matemática del algoritmo es precisamente que este último hecho garantiza que la solución encontrada por el algoritmo (con el siguiente procedimiento) es siempre la óptima (lo cual, como se verá, también tiene ciertos inconvenientes). Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Incluir el nodo de origen en la lista OPEN y calcular su coste asociado  $f(n_0) = g(n_0)$  ( $h=0$  en el origen).
2. De sus 8 posibles sucesores, pasar a la lista CLOSED el de menor coste asociado. En caso de haber varios, la disyuntiva se resolverá arbitrariamente.
3. Si el nodo así seleccionado es el objetivo, finalizar el algoritmo y usar los punteros (mediante la lista OPEN) para obtener, volviendo hacia atrás, la trayectoria que ha dado lugar a la obtención del óptimo. En caso contrario, continuar iterando.
4. Para todos los 8 posibles sucesores del nodo "n" del paso anterior que no estén en la lista CLOSED, calcular el coste.
5. Si alguno de los puntos del paso anterior no estuviera en el listado OPEN, añadirlo, así como sus respectivos punteros al punto del que proceden (n-1).

6. Para aquellos puntos que ya estaban en OPEN, cambiar el valor de su función de coste asociada si ésta (en el paso 4.) ha disminuido respecto al valor en la iteración anterior.
7. Seguir iterando en el paso 2. Hasta que 3 alcance el objetivo.

Para agilizar la inclusión de este popular método en el planificador, se ha decidido descargar una versión ya implementada, validada y optimizada computacionalmente de la página web oficial de Matlab ([21]), Aun así, ha sido necesario trabajar en la interfaz que enlaza el algoritmo A-estrella con el modelo matemático en esféricas del problema de este TFM.

Como inconveniente del método de inicialización de soluciones seleccionado, cabe destacar el hecho de que desde un punto de vista de eficiencia computacional, el algoritmo A\* no es del todo competitivo, pues su tiempo de convergencia crece exponencialmente con el tamaño de la cuadrícula estudiada, que por motivos ya expuestos será de 1080x540. Además, el algoritmo también es más lento en alcanzar la solución cuanto más alejados estén los puertos de origen y destino del buque.

Además, el hecho de que el algoritmo sólo devuelva la solución óptima, y únicamente esta, en caso de tener solución el problema, supone un problema desde el punto de vista de generación de población inicial para el GA. Esto es debido a que en ciertas ocasiones el principal interés de este TFM consiste precisamente en discernir entre dos trayectorias muy próximas entre sí en distancia (por ejemplo cuando la misma sea similar entre el NWP y el paso por el Canal de Panamá). En este caso, sería ventajoso que el A\* se pudiese adaptar para devolver las N mejores soluciones, pero al no ser esto posible, se detallará en la sección de particularidades, qué estrategia se ha seguido para, llamando varias veces a este algoritmo, obtener una población inicial para el GA lo suficientemente variada.

### 3.1.2 Algoritmo Genético

Esta técnica matemática es probablemente el ejemplo más clásico y popular de la familia de algoritmos de optimización evolutivos. Está basada en la emulación de los mecanismos biológicos descritos en la Teoría Darwiniana, que permiten que un individuo, descrito por un conjunto de genes, obtenga mediante mecanismos de cruce (por herencia) y mutación (por un fallo aleatorio en la copia de los genes) una ventaja evolutiva que le permita una mayor probabilidad de supervivencia y reproducción. Esta teoría se conoce como Selección Natural, y es el mecanismo fundamental que explica la evolución y pervivencia de las especies.

Los algoritmos genéticos se sustentan en la analogía que se pueden establecer entre: un individuo de una especie (que compite por ser el mejor en su coste) y una solución al problema que se pretende optimizar, entre una población de individuos y el conjunto de soluciones a dicho problema por otro, y entre el grado de adaptación al entorno de cada individuo y el valor de la función de coste de cada solución.

Los tres operadores matemáticos principales que constituyen el GA son: el de **selección**, que permite, mediante distintas estrategias posibles, a los mejores individuos tener más descendencia que los peores (Selección Natural); el de **cruce** que combina tramos de la

codificación numérica de las parejas de individuos seleccionados (padres) para constituir parejas de hijos; y el de **mutación**, que permite, bajo una cierta probabilidad, el cambio aislado de ciertos valores de la solución. Estos dos últimos operadores son los denominados genéticos (responsables de emular procesos puramente biológicos), mientras que la selección está determinada por el entorno en el que se desarrolla el problema (función de mérito).

Antes de entrar a describir con más detalle cada operador es, conviene destacar que el GA se ejecuta un número máximo de iteraciones (o bien hasta que se cumpla un criterio de convergencia), siendo cada una de estas iteraciones el equivalente a una generación de individuos. Para pasar de una generación a la siguiente, se utiliza el mecanismo de **recombinación**, que en esencia, de entre los N padres y N hijos generados en la iteración "t-1", elige cuáles de entre ellos son los N más adecuados (según el criterio elegido) para pasar a la generación "t". Además, hay que **generar** una población inicial mediante algún otro método, como puede ser una optimización previa determinista (como es el caso de este TFM, mediante el algoritmo A-estrella) o mediante una serie de individuos con valores aleatorios.

Para representar matemáticamente al individuo, se debe realizar una codificación análoga a la que se lleva a cabo en la información genética de un ser vivo, pudiendo ser ésta de tipo binario (como son aproximadamente los genes), o bien decimal en forma entera o real. La elegida para codificar las trayectorias de este TFM es real, pues de esta forma se representa directamente el conjunto de  $2 \cdot n$  puntos (latitud-longitud) que representan a cada posible trayectoria (individuo).

A continuación se detalla el funcionamiento de las operaciones que se acaban de mencionar.

### **3.1.2.1. Generación**

En general hay dos formas de proceder. La primera, que consiste en generar soluciones totalmente aleatorias, se utiliza habitualmente cuando no se tiene ningún conocimiento previo de en qué zona del espacio de búsqueda puede hallarse alguna solución óptima (local o global). En caso contrario, cuando sí se tiene un conocimiento previo (como es el caso en este TFM), es conveniente partir de alguna de las soluciones aproximadas (en nuestro caso la salida del algoritmo A\*) y perturbarla aditiva y aleatoriamente (por ejemplo utilizando un ruido gaussiano de media nula y desviaciones típicas, cuyos valores pueden ser seleccionados mediante un parámetro de entrada al GA) para obtener un conjunto de N soluciones próximas a la original.

### **3.1.2.2. Selección**

Esta función se encarga de seleccionar, en cada iteración t del algoritmo,  $N_p$  parejas de entre la población N (inicial o de un paso de iteración anterior t-1). Es habitual que  $N_p$  sea  $N/2$ , aunque también se puede usar un valor relativamente mayor, y de las parejas seleccionadas, desechar las que se parezcan mucho o las que sean muy diferentes, ya que generalmente las primeras aportan poco al cruzarse, y las segundas tienden a volver a zonas intermedias del espacio de búsqueda que con cierta probabilidad han sido ya visitas, y desechadas, por el GA.

Los métodos de selección de cada individuo se clasifican en base a varios criterios:

- **Estáticos y dinámicos**, en función de que dicha probabilidad sea constante o cambie con las iteraciones.
- **Preservativos o extintivos**, para diferenciar el caso en los que todos los individuos tienen alguna posibilidad de reproducirse del que no.
- **Proporcionales o de torneo**, siendo los primeros aquellos en los que los individuos que se van a reproducir se seleccionan atendiendo a su mérito respecto al mérito total de la población (esto los hace dinámicos, pues un mismo individuo que no ha mejorado con las generaciones puede dejar de ser interesante si el mérito total de la población aumenta de forma importante) y los segundos aquellos en los que existe una aleatoriedad previa al ordenamiento en base a la función de coste.

Entre los primeros está uno de los métodos de selección más clásicos, que de hecho es el que se ha elegido para usar en el presente TFM, y que se denomina habitualmente **Método de la Ruleta**. En éste, directamente utilizable cuando los méritos de los individuos son no negativos<sup>17</sup> se suman incrementalmente los méritos de todos los individuos de la generación, se elige aleatoriamente un número según una distribución uniforme entre 0 y el valor de dicha suma, y se elige el individuo cuya suma incremental comprenda al valor aleatorio obtenido. Este proceso se repite hasta formar las  $N_p$  parejas, por lo que el mismo elemento podrá ser seleccionado en varias de ellas, y esto será tanto más probable cuanto mejor su función de mérito.

El ejemplo clásico de Método de Torneo, utilizado habitualmente en GA, consiste en elegir un subconjunto aleatorio de  $T$  individuos ( $T < N$ ) y entre ellos seleccionar el mejor. Este proceso se repite para elegir cada uno de los padres que se cruzarán en la siguiente etapa del algoritmo.

### **3.1.2.3. Cruce**

En los sistemas biológicos, el cruce es un proceso que ocurre durante la reproducción entre parejas de cromosomas y que consiste en la alineación de los mismos, y su división en tantos fragmentos como números de corte más uno, que son a continuación combinados para formar los cromosomas del nuevo individuo. Esta forma de proceder se implementa directamente en un conjunto de operadores de cruce de los GAs, que dividen las cadenas de elementos en la que se encuentran codificadas los padres y crean los hijos concatenando los fragmentos creados en la división mediante permutaciones.

Es importante destacar que, al tratar este TFM sobre optimización de trayectorias reales, los puntos de las mismas en los que se realiza el corte y el empalme de los consiguiente fragmentos que formarán los individuos resultantes, deberá hacerse en puntos que coincidan geográficamente en cada una de las trayectorias de la pareja que se reproduce. Esto es necesario para evitar cambios bruscos en la cadena resultante, ya que el sentido físico de las mismas se va perdiendo según aumenta la distancia entre los puntos seleccionados en cada progenitor para realizar el cruce

---

<sup>17</sup> En caso contrario, es necesario desplazar/re-escalar los valores para convertirlos en positivos.

Se introduce aquí esta restricción de nuestro problema para ir anticipando lo importante que será definir una serie de Way-points fijos en las trayectorias, como se verá en la siguiente sección.

Las principales variantes son en primer lugar el cruce por 1 o n puntos (siendo recomendable para problemas como el de este TFM que n no supere el valor de 4), donde de manera aleatoria se determina por qué puntos se cortan y recombinan las cadenas originales. Aunque este es el proceso habitual, para este TFM la selección aleatoria no se dará entre cualquier punto de la cadena de valores que codifica las trayectorias, si no que se dará entre los WPs anteriormente descritos.

Un método alternativo, el cruce uniforme va barriendo cada posición de uno de los padres, y en función de una probabilidad evaluada en cada posición, se decide si el elemento que adquirirá el hijo vendrá de ese progenitor, o bien del otro. Esta forma de proceder tiende a conseguir una mezcla importante entre las dos cadenas, con el inconveniente ya mencionado de generar cambios bruscos en una codificación como la que nos afecta. Existen variantes de estos operadores que, para no privilegiar que elementos adyacentes de una misma cadena sigan siéndolo en su descendiente, desordenan el padre antes de cortarlo, guardan en memoria la secuencia de "desorden", proceden al cruce como se ha comentado antes, y por último, en el hijo así resultante, deshacen el cambio de orden anterior para no perder el sentido físico de la codificación.

También es importante destacar, por su potencial aplicabilidad al caso de este TFM, los operadores de cruce pensados para codificaciones reales, donde en vez de concatenar elementos cortados de las cadenas originales, se hace una mezcla más suave mediante combinaciones (generalmente lineales) de los valores de los padres.

A medida que se iban obteniendo los resultados de las simulaciones con el método de cortes por puntos discretos (con los que se presenta lo expuesto en el Capítulo 4), se ha probado a implementar la anterior estrategia de cruce real continuo con interpolación lineal, probándose los resultados en alguna de las trayectorias que se habían ido obteniendo, particularmente aquellas en que peores características de convergencia se habían obtenido. Sin embargo, se ha llegado a la conclusión de que los resultados son muy similares, por lo que se ha decidido continuar con la estrategia inicial en todo lo que sigue.

#### **3.1.2.4. Mutación**

Es un mecanismo que se aplica a los hijos obtenidos de un cruce, y en muchas ocasiones se considera un operador secundario ya que generalmente se aplica a un número pequeño de elementos de cada individuo<sup>18</sup>. Sin embargo, aportan una importante ventaja, ya que permiten explorar zonas del espacio de búsqueda nuevas, una vez generadas las trayectorias iniciales y los consiguientes cruces, que siempre se mantienen dentro de una zona cerrada de dicho espacio.

---

<sup>18</sup> Presentan un comportamiento análogo al que ocurre en la naturaleza, en la que escasos genes sufren mutaciones, tanto durante la reproducción como durante la vida de un individuo (aunque estos últimos no se transmitan a la descendencia).

Se considera adecuado realizar mutaciones en un número pequeño de elementos de la cadena de genes, del orden de la inversa de su longitud (es decir mutar un valor de cada individuo en cada iteración). Además, para codificaciones reales como las que nos incumben, existen dos grandes mecanismos para calcular el valor de la nueva coordenada geográfica mutada, siendo estos la mutación uniforme y la incremental. En el primero, el nuevo valor se calcula de forma aleatoria entre cualquier punto del espacio de búsqueda (cualquier pareja latitud-longitud). En el segundo, el nuevo valor depende del inicial y de unos umbrales que podrán ser elegidos como parámetros del planificador. Como los cambios que permite el primer procedimiento pueden resultar excesivos en el problema tratado en este TFM se ha optado por el segundo. Además, existe también la posibilidad de reducir la amplitud de los umbrales a medida que avanzan las generaciones, de forma que se permita una mayor exploración del espacio aún no abarcado en los instantes iniciales, evitando en la medida de lo posible que el GA quede atrapado en óptimos locales.

Aunque se verá con detalle en la siguiente subsección, se anticipa que este operador del es el que más se ha modificado respecto a su forma canónica, para el de este TFM, ya que se ha tomado la decisión de aumentar significativamente (respecto al valor orientativo mencionado anteriormente) las probabilidades de mutación de los puntos situados en algunas zonas del mapa.

### **3.1.2.5. Recombinación**

Este procedimiento decide, una vez cruzados y mutados los  $N$  individuos para generar otros  $N$  hijos, cuáles del total ( $2 \cdot N$ ) son elegidos (o descartados) para formar parte de la siguiente iteración.

La estrategia más simple para esta acción es la llamada sustitución generacional, en la que todos los padres son reemplazados por todos los hijos, lo cual evidentemente tiene el inconveniente de que si todos los hijos fracasan en mejorar a sus padres, se estarán perdiendo "buenas soluciones", y empeorando el óptimo hallado. Por ello, son más frecuentes las tácticas elitistas, en las que un cierto número de las mejores soluciones son pasadas a la generación  $t+1$ .

Existen también técnicas clásicas específicas de problemas multi-objetivo, como el NSGA-II, pero no se abundará en ellas al ser la función de mérito de este TFM mono-objetivo.

De las técnicas empleadas, se han usados dos variantes del elitismo. La primera, llamada "2-N sort", consiste en juntar la población original de la generación junto con sus hijos, y de los  $2N$  individuos quedarse con los  $n$  mejores. La segunda, que consiste en descartar al peor hijo y reemplazarlo por el mejor de los padres, ha sido descartado a la hora de obtener de forma generalizada los resultados presentados en el último capítulo, debido a que en un análisis inicial obtuvo peores soluciones.

### 3.1.2.6. Criterio de parada

Por último, el criterio de parada responsable de detener las iteraciones del planificador antes de alcanzar el número máximo de iteraciones se explicará en la subsección de particularidades de los algoritmos usados en el TFM, debido a sus propiedades especiales.

## 3.2. Adaptación Heurística de los Algoritmos

A continuación se entrará a detallar cómo se ha procedido a programar cada uno de los pasos genéricos anteriormente descritos, haciendo especial hincapié en las dificultades encontradas para su correcto funcionamiento, en las adaptaciones especiales de los operadores respecto de sus versiones canónicas, y en el desarrollo de algunas funciones de Matlab adicionales, para implementar sub-operadores específicos diseñados para complementar estos mecanismos generales.

### 3.2.1 Algoritmo A-Estrella

El código Matlab de este algoritmo se implementa en la función `A_Star_conHielo_preGA_gridFino_woBucleMAX_XY_fun_Wps`.

Sus entradas son las siguientes:

- Los nombres y coordenadas de los puertos de origen y destino.
- La estructura del mapa, que agrupa todos los datos de latitud-longitud de los continentes e islas a tener en cuenta (obtenidos, con precisión burda, a partir de los niveles L1 y L2 de los datos GSHHS descritos en el Capítulo 2).
- La estructura del hielo en la fecha de partida, o los contornos artificiales de hielo (que se utilizan sólo en la segunda llamada al A\*, cuando los puertos son suficientemente septentrionales, e interesa, por falta de precisión de este modelo matemático, que la zona polar ártica pueda ser explorada y luego discernida por el GA).
- El número de los mayores bloques de hielo que se quieren conservar para esta fase preliminar de los cálculos. Normalmente se entrará con un valor de 7 en el número máximo de bloques de hielo considerados, ya que se ha comprobado que tanto en invierno como en verano conservan un porcentaje más que suficiente de la superficie total del mismo, y que el hecho de que conservar más aumenta en demasía el tiempo de cálculo, sin aportar información geográfica adicional realmente significativa.

Sus salidas son:

- La trayectoria óptima hallada.

- La distancia mínima de cada punto de la trayectoria a los contornos prohibidos o zonas de restricción. Aunque esta salida adicional ralentiza ostensiblemente la ejecución de la función, aporta un dato fundamental en la lógica seguida en la función de generación del GA para determinar la posición de los WPs fijos, tal y como se verá más adelante
- El número total de canales atravesados (de entre los dos considerados).
- Los nombres de los canales atravesados.

En el código de esta función, lo primero que se hace es definir un tamaño de la cuadrícula rectangular sobre la que se proyectará la geografía obtenida. Se ha decidido no dejar el tamaño de la cuadrícula como entrada a la función, y posible parámetro de ajuste a optimizar en la evaluación sistemática llevada a cabo, puesto que con el valor usado de 1/3 de grado se obtiene una precisión suficiente sin necesidad de tiempos de computación excesivos. Como muestra de lo anterior, valga el ejemplo de que para una trayectoria en aguas no demasiado cerradas y una distancia total de unos 9000 km, el algoritmo con la anterior resolución de grid tarda unos 20 minutos en encontrar la solución, mientras que para una trayectoria de unos 14000 km, atravesando el NWP y con una precisión de 1/4 de grado, el tiempo aumenta dramáticamente hasta las 7-8 horas, lo cual es inviable y no aporta una precisión notable.

A continuación se genera una malla abarcando 360° de longitud y 180° con la anterior precisión de 1/3°, y se inicializa una variable MAP a 2 en todos los puntos de dicha malla, que a continuación se cambiarán a -1 allí donde se encuentre un obstáculo o restricción, a 0 en el nodo objetivo, y a 1 en el que ocupa el buque en cada iteración del A-estrella.

Posteriormente se barre en un bucle cada uno de los elementos de la estructura del mapa y del hielo. Se manipulan por separado ambos tipos de datos por especificidades que hacen especialmente complejo, como se verá más adelante, el contorno de hielo, sobre todo el invierno.

En el interior de este bucle, para cada continente o isla por separado se determinan todos los puntos del contorno continental, así como los interiores al mismo, y todos ellos se llevan a la lista MAP = -1. El motivo de que se tengan que almacenar todos los puntos interiores necesariamente, a pesar de ser un considerable engorro a nivel de programación y de penalizar en tiempo de ejecución al algoritmo, es que si dos puntos consecutivos del contorno están dispuestos en diagonal, pero el punto que está "por detrás" de dicha diagonal según se mira desde el océano está libre de obstáculo, entonces el buque podrá pasar y atravesar dicho continente hasta su otro extremo. La forma matemática de determinar si un punto está en el contorno puro de un continente es barrerlos en sus coordenadas, y asignar MAP=-1 a sus cuadrículas más cercanas. Una vez hecho esto se echa mano de la función de Matlab `inpolygon` que, dado un polígono cerrado y una malla 2-D que lo contiene, devuelve una matriz con unos en los puntos interiores y ceros en los exteriores.

En la siguiente figura se muestra el conjunto de los continentes (en verde) y hielo (magenta) y sus puntos interiores, representados en el entorno gráfico del A\* con el

tamaño de cuadrícula de  $1/3^\circ$ , así como los puertos de origen (Port-Moresby) y destino (Casablanca).

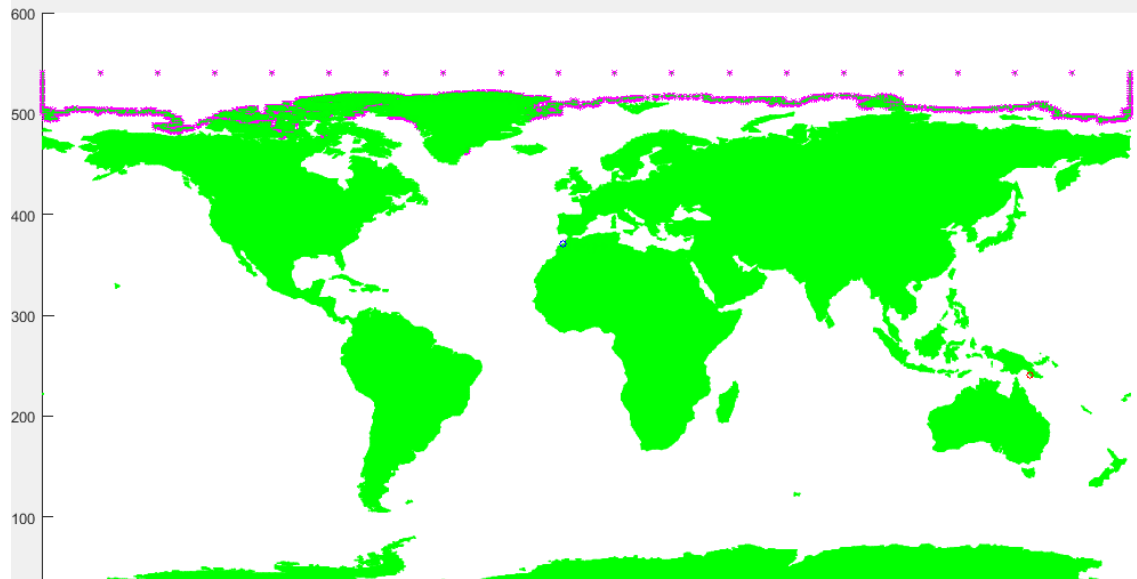
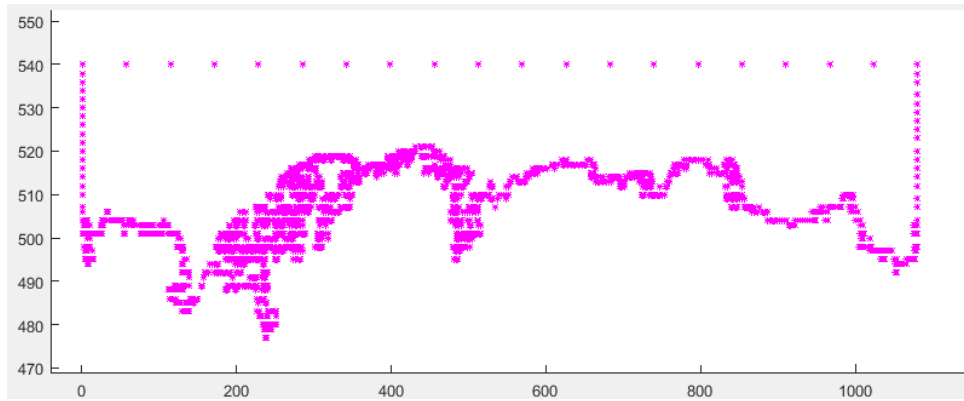


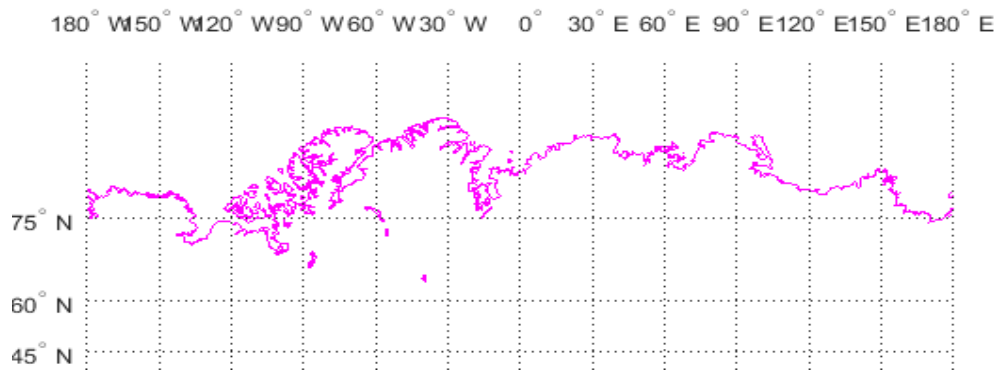
Figura 11 Conjunto de los continentes y sus interiores con precisión GSSHs 'coarse' y borde del hielo en magenta

Como ya se ha comentado, el tratamiento del hielo se ha hecho de forma distinta. Por una parte, porque para cerrar el contorno en las coordenadas 2-D de trabajo, y así poder determinar sus puntos internos como se hizo para los continentes, es necesario definir unos límites artificiales por el meridiano  $-180^\circ$  y en el polo norte. Por otra parte, la siguiente secuencia de figuras explica, por lo enrevesado de la geometría de los límites del hielo, por qué es necesario dar un rodeo matemático importante para evitar el uso del comando de Matlab `inpolygon` que tan bien funcionó con los continentes.

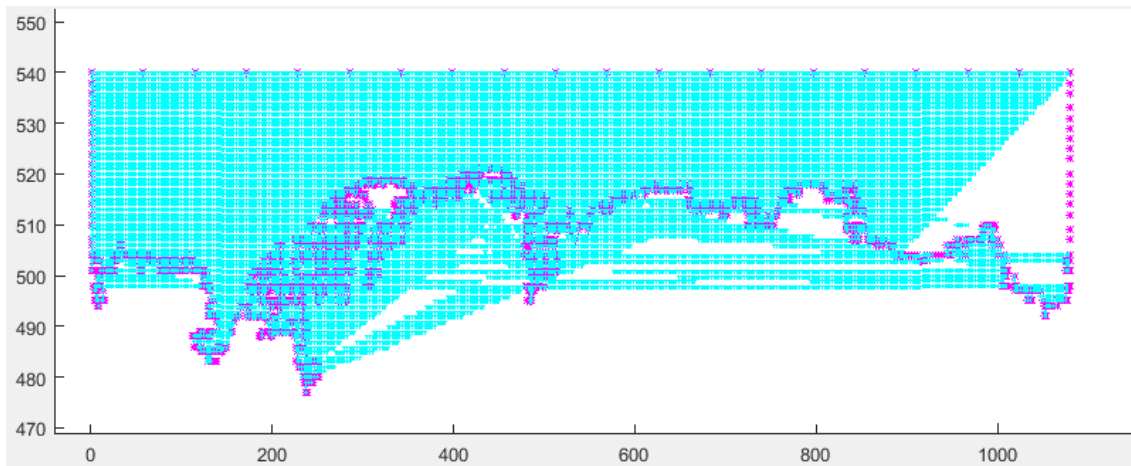
En la primera de las subfiguras de la Figura 12 (a) se aprecia el contorno de hielo con la discretización de la malla ya definida, siendo la segunda (b) la carga de los mismos datos, sin discretización y proyectada con Mercator, que es tal y como se usará y presentará gráficamente en la siguiente parte del GA. El afán de presentar estos mismos datos con un nivel de resolución mucho más alto es el de que se comprenda que un contorno con tantos quiebros, entrantes y salientes muy próximos entre sí, se convierte al discretizarlo en el grid del A\* en una nube relativamente informe de puntos, y este es el motivo último de que la función `inpolygon` no sea capaz de determinar correctamente sus puntos interiores, lo cual es necesario.



a) Contorno del hielo con la discretización de la malla ya definida



b) Datos sin discretizar proyectada con Mercator utilizada en GA



c) En azul, puntos considerados internos al contorno del hielo en rosa

**Figura 12** Explicación gráfica de los problemas encontrados a la hora de discretizar los contornos de hielo

En c) se muestran en azul los puntos que la función `inpolygon` devuelve como internos al contorno rosa de hielo. Es evidente que los mismos no son válidos para usar como internos al contorno del hielo, y por lo tanto puntos prohibidos para las trayectorias de los buques, porque hay puntos en azul que están fuera del verdadero interior del contorno y, no menos grave, no todos los que realmente son interiores

quedan catalogados como tal (ver la esquina más al Este). El motivo de este comportamiento inapropiado es que el contorno magenta de hielo es complejo, con muchos entrantes y salientes en zonas pequeñas, así como islas cercanas al grueso del casquete polar, que dificultan que la salida de `inpolygon` sea la adecuada. Para solventar el problema, se ha decidido aplicar al contorno de hielo así definido una función descargada de la página de Mathworks llamada `points2contour`, que calcula la envolvente aproximada de una nube 2D de puntos, con el que se consigue suavizar la forma de dicho contorno, y esta vez ya sí, poder usar una función sencilla que determine todos los puntos que están dentro de dicho contorno.

Sin embargo, no ha sido posible usar a tal efecto la anterior función `inpolygon`, sino que ha sido necesario elaborar un código propio por parte del alumno, denominada `contorno_inout`, basado en un método matemático de suma de ángulos que forma un punto con cada uno de los segmentos que conforman un contorno, para discernir si los puntos estaban o no en el interior.

Una vez realizadas todas las manipulaciones necesarias para definir la zona prohibida, codificada por puntos  $MAP(ix,iy)=-1$ , se asignan los valores de destino y origen, para lo cual (así como para cualquier coordenada originalmente introducido en esféricas), es necesario hacer, y posteriormente deshacer una vez se vuelve al script desde el que se llama al A\*, el cambio de coordenadas

El resultado de esta asignación de puntos interiores al contorno es más costosa que el uso de `inpolygon`, ya que hay que llamar a la función punto a punto de la parte más septentrional del grid que se quiere evaluar, para ver si esta dentro del contorno (el rojo en la Figura 13), y aun no siendo perfecto, se aprecia en dicha figura que es mucho mejor que la situación anterior, y que las zonas "prohibidas falsas" que realmente están fuera de la zona de restricción son pequeñas y de escaso interés para la navegación comercial, por su gran cercanía al hielo y tendencia a estar en bahías que este forma. En la práctica, asignando estos puntos azules a los asociados a zonas prohibidas por hielo en el Algoritmo A\*, se consigue de forma adecuada que los buques no puedan atravesar el hielo, sin penalizar significativamente la navegación cercana al contorno de hielo, en paralelo al mismo, como sí ocurría en la situación asociada `inpolygon` a en la Figura 12.

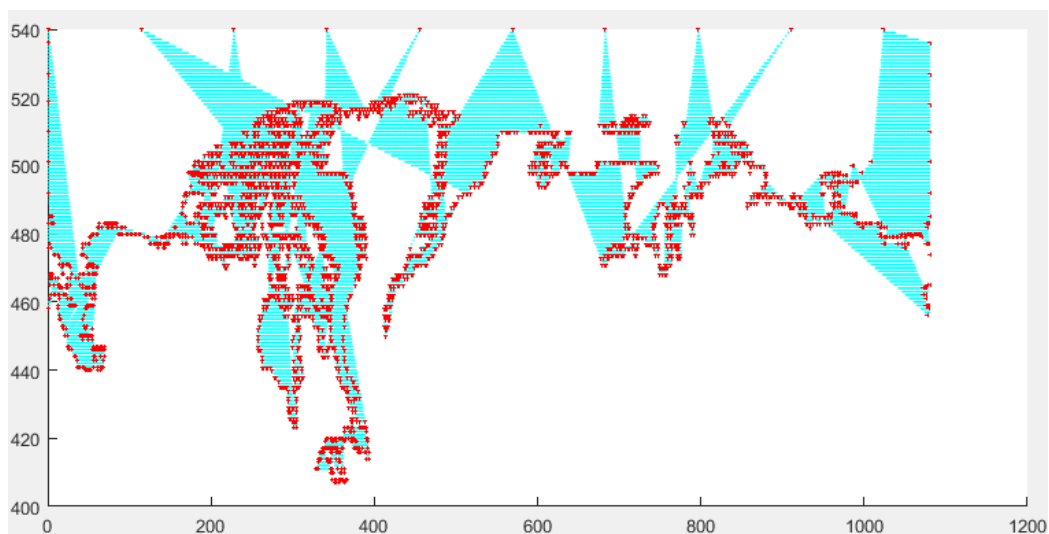


Figura 13 Solución aproximada al problema de obtener un número suficiente puntos interiores (azul) al contorno de hielo

A continuación se procede a un paso manual, que consiste en despejar artificialmente canales o estrechos que se han perdido por la baja precisión se ha debido imponer para poder abordar numéricamente el problema, asignando a 2 el valor de MAP en coordenadas que se han determinado gráficamente una vez congelada la resolución, y el tamaño definitivo de la malla, así como la familia GSHHS de datos geográficas (precisión 'c') . También hay que forzar situaciones contrarias, asignando un -1 a MAP para que la península de Alaska no se convierta falsamente en isla, permitiendo el paso de buques que puedan así cortar distancia.

También han sido necesarias manipulaciones de las funciones internas del propio código particular descargado para la implementación del A\*, en concreto para introducir una métrica de distancia no cartesiana sino esférica, así como para permitir que las trayectorias pasen por las paredes verticales de las cuadrículas, es decir a través del meridiano de longitud  $-180^\circ$  (línea de cambio de fecha). Por brevedad, no se entrará en el detalle de su implementación.

### 3.2.2 Algoritmo Genético

En esta sección se describirán, sin entrar en un excesivo grado de detalle a nivel de código y variables empleadas, las distintas funciones que implementan los mecanismos principales del GA. Se excluyen de la exposición aquellas que son muy sencillas, o bien una implementación directa del código presentado en los apuntes de la asignatura OHA (como es el caso del algoritmo genético en sí, que es en esencia una estructura while y está presenta en `ga_basic`). También se acompañan las descripciones de figuras con tramos de trayectorias generadas por cada uno de ellos, que ilustran bien el valor que aportan en cada uno de los pasos del GA.

#### 3.2.2.1. Generador de trayectorias iniciales

Se implementa en la función `generate_fromAstar_v6`, que ha sido sin duda el código que más trabajo ha requerido, en la parte de GA, de este FTM. En primer lugar se detallan sus entradas y salidas más relevantes.

##### **Entradas:**

- Los puertos de origen y destino, la trayectoria inicial propuesta por A\*, y la distancia mínima de los puntos de la trayectoria a los contornos.
- La trayectoria alternativa inicial propuesta por A\* sobre el contorno artificial de hielo (en rojo en la siguiente figura), que permite explorar posibles pasos beneficiosos en distancia por el Ártico, para el caso en que por pérdida de precisión en el algoritmo A\*, un pequeño resquicio entre costa y hielo se pierda con la resolución burda. En todo caso, si luego dicha trayectoria es realmente inviable (p. e. lo será siempre en pleno invierno), el GA la acabará descartando a lo largo de su evolución.

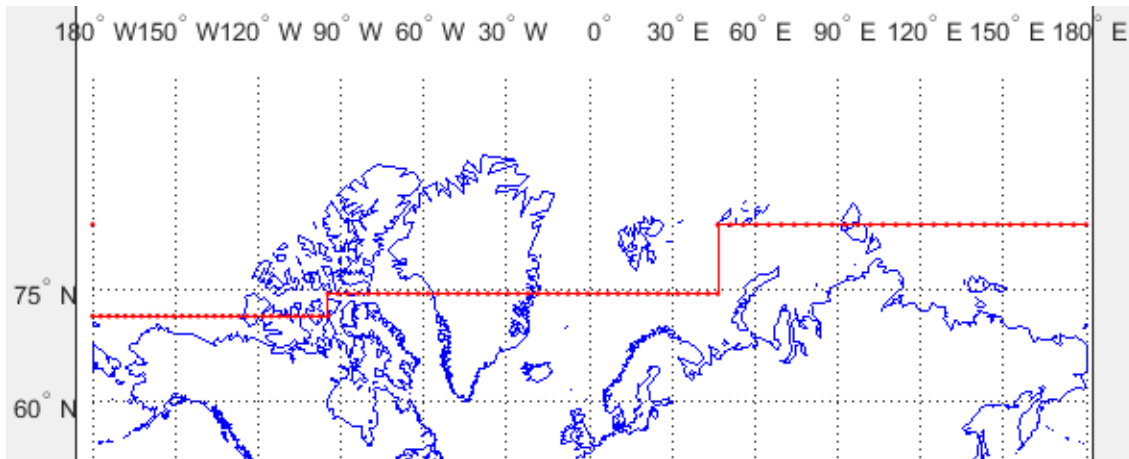


Figura 14 Contorno empírico artificial (rojo) de hielo usado para dar la oportunidad de explorar trayectorias posiblemente factibles

- El método seguido para generar la familia de trayectorias, a elegir entre: clásico, A-estrella, o A-estrella combinado con geodéticas.

El primero de ellos, ya empleado en el trabajo de la asignatura OHA, es el más sencillo, pues se basa en introducir un ruido gaussiano en cualquier dirección (independiente y con misma amplitud en ambas coordenadas del espacio) respecto a una solución inicial conocida, sea ésta una ortodrómica (curva de mínima distancia sobre una esfera, o círculo máximo) directa (en general con gran parte sobre zona restringida) o una serie de ortodrómicas que enlazan WPs predeterminados por el usuario (y por tanto con un grado nulo de automatización). Este método no tiene especial interés, pues ya se comprobó entonces que, sin añadir nuevos mecanismos, conduce a resultados deficientes.

Se incide por tanto en los nuevos métodos, por lo que se hablará únicamente del último, que combina la técnica del A\* con el hecho de enlazar algunos de los Wps, de forma aleatoria con una probabilidad ponderada con la distancia entre los mismos, y el grado de penalización adicional que introduce abandonar de esta forma el camino original del A\*. La descripción del procedimiento se hará posteriormente, uera de la sección de entradas/salidas.

- El número de individuos de la población, que serán utilizados en mayor medida para albergar soluciones asociadas a la primera inicialización del A\* y en menor para la solución se decida correr el A\* sin restricción de hielo, y en este barrido se encuentre una solución distinta. Como en general las soluciones así generadas serán bastante diferentes, se verá que los mecanismos evolutivos no permiten que se mezclen entre ellas, pues en general eso conducirá a una zona del espacio de búsqueda no factible.
- El factor\_gaussiano, que es básicamente el parámetro que controla el ruido aditivo que se le añade a la solución original obtenida del A\*. Se verá en la descripción del cuerpo de la función qué mecanismos geométricos se emplean para dar forma a las trayectorias una vez seleccionado este número, que se barrerá entre 0.05 y 0.1 en la caracterización estadística del GA (ver Capítulo 4).

- El número máximo de WPs, cuya influencia será en la caracterización estadística del GA (ver Capítulo 4).
- La fecha inicial de trayectoria (aunque se modificará donde más influencia tiene, en la función de coste, para tener en cuenta el día aproximado de paso por la zona polar).
- El número total de contornos separados de hielo a considerar. Téngase en cuenta que se ordenan de mayor a menor en superficie, por lo que su valor (se usará 7 en lo que sigue) indicará cuantos de los mayores se utilizan.
- El número de canales atravesados, y sus nombres en un array de cadenas de texto. Esta información es también salida del A\*.

**Salidas:**

- Un array de estructuras x (usado por todas las funciones del GA), con los elementos seleccionados en la población inicial y cuyas componentes son:
  - Un array de 2 columnas y número variable de filas, con el que se codifican las coordenadas de la trayectoria en cuestión. Para no ralentizar en exceso la computación, cuando excede de 650 filas, se reduce el muestreo a la mitad.
  - Una señal lógica que indica qué trayectorias se han obtenido a partir de la solución obtenida por la segunda llamada al A\* con hielo artificial, siempre y cuando ésta haya resultado distinta a la solución de la primera llamada. Todas las trayectorias que deriven de las así generadas, a lo largo de los sucesivos mecanismos evolutivos del GA, conservarán esta característica con fines de trazabilidad.
  - Los índices asociados a las variables de las coordenadas donde se almacenan los WPs fijos. Los índices del Puerto de origen y destino se añaden a esta lista, para facilitar el posible trazado de ortodrómicas en todos los posibles tramos de la trayectoria.
  - La distancia acumulada a lo largo de todos los puntos de cada una de las trayectorias.
  - El tiempo acumulado hasta llegar a cada uno de los puntos de cada una de las trayectorias. Para calcularlo, se ha integrado en el  $dx/V$ , siendo V la velocidad, variable a lo largo de la trayectoria en la forma compleja ya expuesta en la sección de Función de Mérito del Capítulo 2.
  - Coordenadas de los puntos de corte de cada una de las trayectorias con los contornos prohibidos de costa y hielo<sup>19</sup>.

---

<sup>19</sup> Se ha programado una protección para avisar por pantalla cuando estos puntos son un número impar, pues entonces la penalización por distancia recorrida en zona restringida deja de tener sentido físico. Sin embargo, se ha comprobado que sólo en unos pocos casos de trayectorias que atraviesan el mar de Bering y cruzan el meridiano de

Una vez definida la interfaz de esta función, se procede a describir con la mayor brevedad posible lo que se hace en cada uno de sus bloques y llamadas a subfunciones, ilustrando con algún ejemplo gráfico.

En primer lugar, se definen, por separado para los conjuntos de soluciones obtenidas a partir de las dos soluciones propuestas por A\*, los way-points que serán fijos (salvo excepciones explicadas por la albañilería geométrica necesaria para hacer un paso fino por los canales de Suez y/o Panamá, sin añadir ruido gaussiano en estos tramos) en la subsiguientes trayectorias. Para ello, se calculan todos los puntos de la trayectoria que están a la mínima distancia de las zonas de restricciones, haciendo uso de la distancia mínima de cada punto a los contornos prohibidos. A continuación se determinan los tramos de trayectoria en los que existe un número considerable de puntos consecutivos que cumplen la anterior condición, que se denominarán zonas de cabotaje, que son muy habituales como salida del A\*, y que también tienen un trasfondo histórico en la navegación marítima, al haber sido usadas por ofrecer rápido refugio en caso de accidentes o mala mar.

En función del número de tramos de cabotaje así determinados y del número máximo de waypoints seleccionado inicialmente, se establecen dichos WPs, preferentemente en las zonas intermedias de las zonas de cabotaje.

Posteriormente se calcula la distancia de cada uno de dichos WPs a los puntos característicos de los Canales de Panamá y Suez, y en caso de que A\* diga que se pasa por alguno de ellos, y dichas distancias sean en todo caso mayores que los umbrales definidos para ambos canales (a continuación se explicará cómo se usan estos umbrales), se modifica el WP correspondiente más cercano al canal en cuestión, hasta que cumpla la condición de estar a una distancia menor que el umbral.

Este procedimiento se lleva a cabo para garantizar que se entra adecuadamente en la lógica condicional que hace que, por debajo de dichas distancias umbrales a algún WP, se modifique la trayectoria salida del A\*, adaptando también los way-points cercanos a las embocaduras de los canales, de forma que el paso (que sería imposible de hallar evolutivamente por ser muy estrecho el conducto) se haga de forma precisa y sin entrar en zona restringida continental. Esto se consigue llamando a la función `reconstructArndChannel`. Un ejemplo de su resultado se muestra en la Figura 15.

Se continúa con un bucle en el que se generan todos los individuos de la población, añadiendo el ruido gaussiano a todos ellos salvo del último (que será la propia salida del A\* sin ruido gaussiano ni modificación alguna, ni en los canales). Además, el ruido gaussiano no se genera de forma independiente en latitud y longitud, sino que se lleva en una dirección perpendicular, en cada punto de la trayectoria A\*, a dicha trayectoria, de forma que al final se obtienen arcos similares a parábolas cuyo eje sería aproximadamente perpendicular a cada tramo entre WPs definidos sobre la trayectoria A\*. Esto se entiende bien en la Figura 16 (donde los WP se representan como cuadrados

---

discontinuidad (-180°) en una zona en la que existe una isla (llamada Wrangling), ocurre este suceso, y la propia evolución del GA descarta rápidamente la solución, en la que la penalización está muy sobreestimada.

en azul), y se ha hecho de esta forma porque la experiencia ha demostrado que generar ruido "en paralelo" al sentido principal de avance dado por la trayectoria original, algunas veces hacia adelante y otras hacia atrás, no suele aportar nada bueno respecto a lo que ya se tiene, desde el punto de vista de mejorar la función de coste.

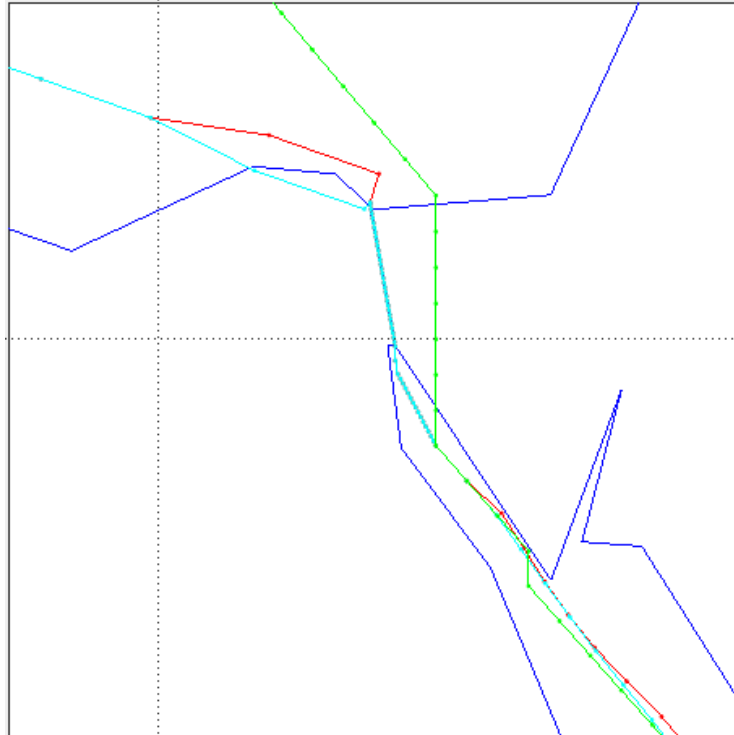


Figura 15 Detalle de la modificación efectuada para conseguir un paso fino por el Canal de Suez respecto al trazo grueso en verde del  $A^*$

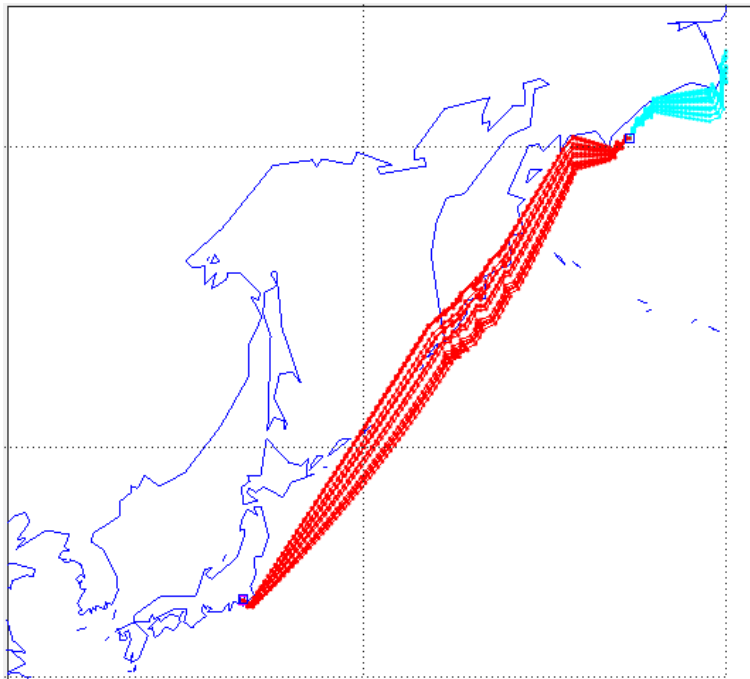
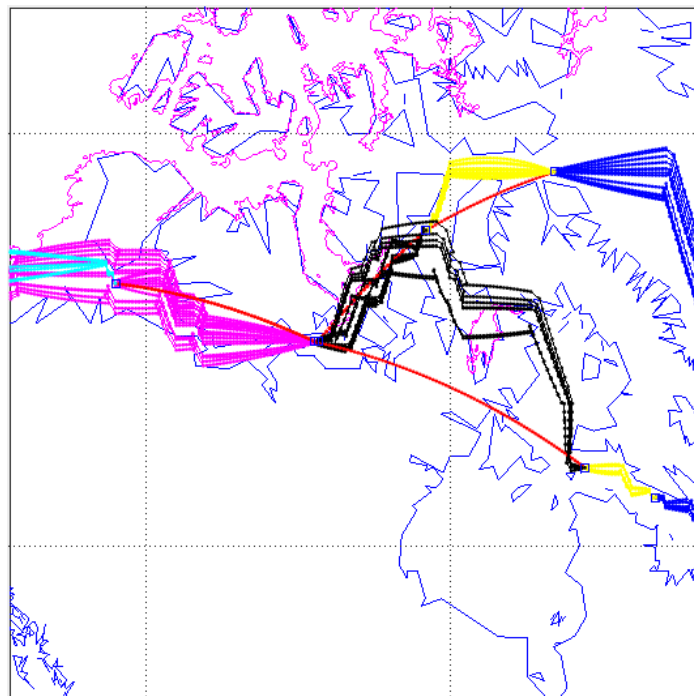


Figura 16 Ejemplo de generación gaussiana con media en solución de  $A^*$ , en forma de incrementos parabólicos

Por otra parte, en la Figura 17 se puede apreciar otra zona de la misma trayectoria, donde además se ven dos brazos posibles, uno más al norte, obtenido alrededor de una salida "nominal" del A\*, y otro más al sur, con menos gaussianas a su alrededor (ya que se limita esta subpoblación a un tercio de los individuos totales), que corresponde a la solución "sin Hielo" del anterior algoritmo pre-generador. Se pueden apreciar en forma de cuadrados los distintos WPs entorno a los cuales se articulan las trayectorias, más o menos cercanos a las costas. Es importante destacar que dicha cercanía será bastante dependiente del número de WPs totales elegidos, cuyo óptimo se estudia en la Caracterización Estadística, para cada trayectoria evaluada. En este caso, se tiene el número mínimo considerado, igual a 9.

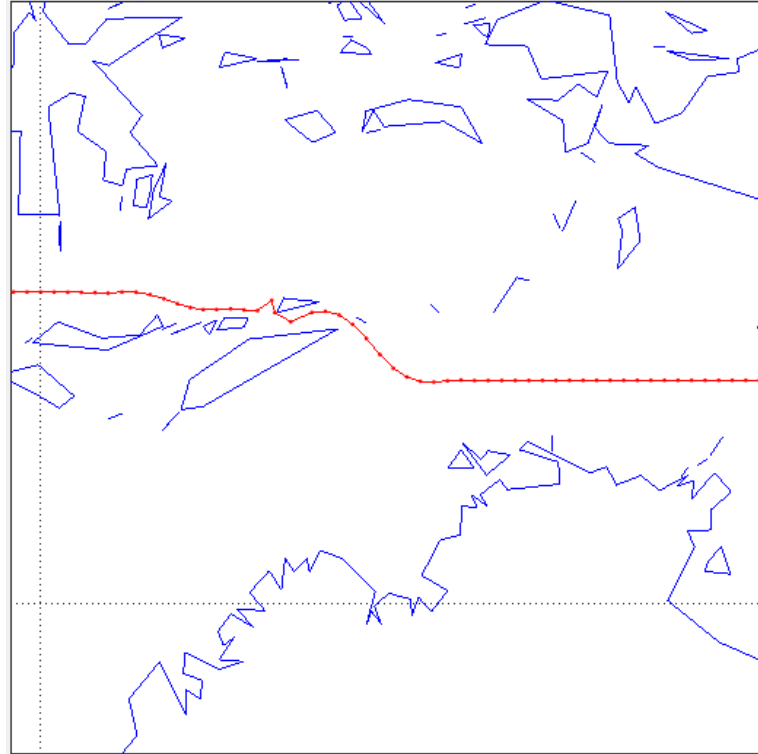
Los tramos rojos, que como se ve no están contruidos como ruido ni siguen quiebros, no son salida del A-estrella, sino que se han generado como tramos entre WPs (consecutivos o no, se pueden saltar) directamente unidos por ortodrómicas (curvas de mínima distancia). La regla general para añadir estos tramos, que pueden mejorar el mérito de las trayectorias obtenidas con A\*, es no generar más de una cuarta parte de los tramos por trayectoria (estableciendo umbrales de probabilidad cercanos a 0.25), y privilegiar aquellos saltos que se hagan en grandes distancias totales (mejora su potencial efecto beneficioso), así como aquellas que atraviesen una zona prohibida menor en distancia que un porcentaje umbral del total de dicha ortodrómica.



**Figura 17** Ejemplo de generación gaussiana con media en solución de A\*, en forma de incrementos parabólicos. Trayectoria Tokio-NYC

Como consideración final respecto a todo lo que se ha programado en esta función de generación, es importante destacar que los resultados brutos de trayectorias, al estar en general muy llenos de quiebros provocados por la naturaleza de las salidas del A\* (enlaza diagonales con tramos de latitud o longitud constante) y su posterior amplificación por ruido gaussiano, han precisado de un proceso de suavizado. Para ello se ha usado un filtro de Savitzky-Golay (implementado en la función propia de Matlab `sgolayfilt`) de orden general 5 y ventana 11 frames, aunque dichos valores se han tenido que adaptar en algunos tramos de las trayectorias donde no existían suficientes

puntos. En la Figura 18 se aprecia el efecto beneficioso que tiene a la hora de conseguir curvas sin quiebros mucho más realistas, efecto que no se consigue con tanta claridad en el ejemplo de las Figuras 16-17, por tener formas de base con muchos más quiebros. Aún así, siguen apareciendo pequeños quiebros agudos para bordear obstáculos como el observado alrededor de la isla de Wetar, Indonesia.



**Figura 18** Detalle del suavizado de las trayectorias conseguido mediante filtros de Savitzky-Golay

### 3.2.2.2 Función de Selección

La implementación de esta función en Matlab ha sido relativamente sencilla, ya que se basa de forma muy directa en el código suministrado en los apuntes de la asignatura OHA, con la especificidad de tratar de forma independiente los dos subconjuntos distintos (en caso de existir dicha diferenciación) de trayectorias de  $A^*$  con o sin hielo.

El método empleado es el de la ruleta, y con respecto a sus entradas, además de la ya comentada estructura 'x' común a todas las funciones del programa, se incluye una matriz con los valores de coste de la población actual. De esta forma, se ahorra en cada llamada a la función de selección, el costoso paso de evaluar la misma (esto también se hace en recombinar y stop, como se sugiere en los apuntes de OHA). También se le indica el número de parejas a seleccionar, cuyo valor se ha fijado a la mitad del tamaño de la población

### 3.2.2.3 Función de Cruce

Se ha evaluado el comportamiento de dos estrategias alternativas desde el punto de vista de facilitar la convergencia de los resultados hacia trayectorias factibles, siendo ambas sencillas y directamente las explicadas en la teoría, y con resultados relativamente similares.

La primera de ellas es un corte por  $N$  puntos, siendo  $N=4$  por la experiencia obtenida del trabajo realizado en OHA con este mismo sistema, en el que se evaluó la alternativa entre los valores de 2 y 4, con resultados mejores en el segundo caso. La especificidad que tiene la metodología, adoptada por su particularidad matemática, ya ha sido anticipada, y consiste en el hecho de restringir, de entre todos los puntos posibles por los que "cortar" y volver a "pegar" los fragmentos de trayectorias, sólo aquellos que han sido determinados, en la fase de generación, como WPs fijos.

De esta forma se obtienen trayectorias "continuas con sentido geográfico". Para evitar en la medida de lo posible tal necesidad, se ha probado a implementar también la estrategia específica de codificaciones reales que se presenta en la teoría de OHA, mediante un sencillo método de interpolación lineal entre trayectorias, siendo el factor para dicha interpolación un número obtenido mediante distribución normal, constante para todos los puntos de la misma trayectoria, pero obviamente variable entre elementos de la población e iteraciones del GA. Probablemente por el hecho de que el número de cortes, igual a 4, es lo suficientemente alto, tal y como se verá en el capítulo 4, existe poca diferencia entre los resultados obtenidos con uno u otro método. Los códigos empleados están disponibles en los script: `cross_byWPs` y `cross_real`.

### 3.2.2.4 Función de Mutación

Como ya se ha anticipado, la implementación de este operador, cuya contribución ha resultado muy importante para encontrar, con carácter general, trayectorias factibles entre dos puertos cualesquiera, es una de las más específicas y adaptadas al problema concreto que se resuelve en este TFM,. En efecto, se ha combinado el trabajo ya anticipado en la asignatura OHA, donde sólo se empleó una mutación no uniforme con una probabilidad igual a la inversa del número de puntos de la curva, con un método que eleva artificialmente la probabilidad hasta 1 (es decir la mutación se realizará siempre), en el caso en el que el punto considerado esté lo suficientemente cerca a una zona de la trayectoria en la que se está violando una zona de restricciones.

Es decir, cuando la trayectoria sea factible, se seguirán haciendo pocas mutaciones, y estas serán no uniformes, cuando ésta entre en zonas prohibidas, se usará el mecanismo de mutación siguiendo una heurística geométrica que facilite el bordeo del obstáculo, como ya se intentó en el trabajo de OHA mediante diferentes mecanismos, basados en la misma idea.

Entrando en el detalle, el mecanismo de mutación selectiva funciona de la siguiente forma: se barren todos los puntos de corte de la trayectoria a mutar con los contornos prohibidos, por parejas consecutivas, ya que como se ha comentado anteriormente, el número de estos debe ser par, para que el término de penalización de la función de mérito tenga sentido físico. Se define un sector de esfera "rectangular" en cuyos cuatro

extremos se colocan los dos puntos anteriores que forman la pareja consecutiva de cortes, y los dos puntos que se forman sustituyendo las latitudes o longitudes de uno de los dos puntos en el otro, de tal manera que el polígono así definido tiene lados de latitud y longitud constante, y además tiene bastantes posibilidades de contener la mayoría de puntos de la trayectoria que están en la zona prohibida, y que por tanto son los que interesa mutar, junto con sus vecinos, para facilitar que la trayectoria resultante pueda bordear el obstáculo.

Esto no siempre es así, ya cuando la distancia entre los dos puntos de corte consecutivos de la pareja considerada es muy pequeña en comparación con el tamaño característico del paso entre puntos de la codificación de la trayectoria, puede que no haya ningún punto intermedio que mutar, y lo que interese mover sean los inmediatamente anteriores y posteriores. Por ello, se establece una condición geométrica que dice que si la distancia entre cortes es menor que un 40% de la distancia media entre puntos que se encuentra localizada en los 5 puntos contiguos al corte, el anterior "rectángulo" se define de forma anterior, con un tamaño de "ventana" que es 1.6 veces dicho tamaño medio característico, tanto en longitud como en latitud. De tal forma se asegura además que no sólo se seleccionan los puntos intermedios entre cortes para mutar, sino también los cercanos que están antes de llegar a la zona prohibida. La función empleada para seleccionar dichos puntos internos a la anterior "ventana", será la ya empleada `inpolygon`.

Posteriormente, se define una dirección en la que privilegiar las mutaciones, que será la perpendicular a la línea de mínima distancia entre los dos puntos consecutivos de corte, dejando una cierta libertad angular en dicho giro, modulada con el mismo parámetro de entrada a la función de mutación, que controla la magnitud de la misma. Concretamente se dejarán hasta  $\pm 5^\circ$  de giro respecto a esa dirección, para un parámetro de mutación de 0.1, y el rango que se barrerá para este último en la caracterización estadística de la última sección será entre 0.14 y 0.3. La dirección de la mutación será pues esa, mientras que el sentido en el que se alejen los puntos será puramente aleatorio cuando el número de puntos de la trayectoria internos al rectángulo de ventana sea no nulo, y el mismo en los dos puntos mutados cuando dicho conjunto esté vacío, en cuyo caso se entiende que los dos puntos de corte estudiados están extremadamente cercanos, como sucede cuando se atraviesa un cabo, isla, u otro tipo de accidente geográfico de especial estrechez, en dirección perpendicular a su principal dimensión.

La siguiente figura demuestra el satisfactorio comportamiento que ha tenido la funcionalidad de mutación así diseñada para sortear, respecto a la trayectoria original en cyan salida del A-estrella, el obstáculo geográfico que constituye la isla de Belitung (Indonesia) en la trayectoria entre Puerto-Moresby (Papúa) y Casablanca (Marruecos).

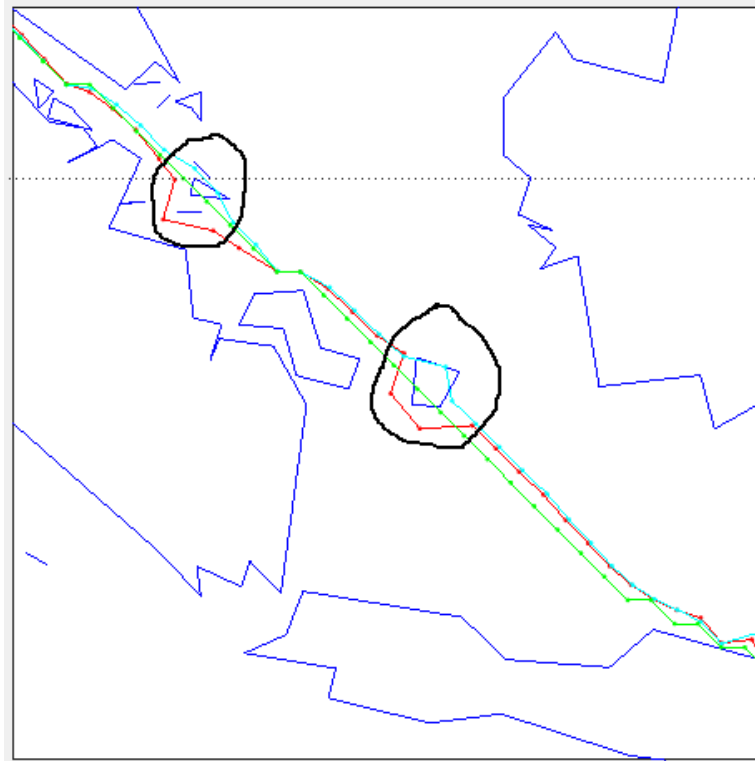


Figura 19 Ejemplo del comportamiento de la mutación alrededor de dos pequeñas islas partiendo de la trayectoria de A\*

### 3.2.2.5 Función de Recombinación

En esta función, muy sencilla y contenida en el script `recombine_2nsort`, se pasa como argumento, como ya se explicó para la de selección, una matriz que almacena los valores de la función de coste tanto para la generación que inicia la iteración de la función principal como la de la salida de la función de mutación, y se elige la mejor de las trayectorias, que se añade al vector de estructuras elegido para seguir iterando, eliminando la peor de las de child. Se tienen dos versiones de esta función, una puramente elitista, y otra que combina la generación de padres con la de hijos, y de los  $2n$  individuos resultantes se queda con los  $n$  mejores ('2nsort'). La usada en la obtención de los resultados del siguiente capítulo es la segunda de estas sub-versiones.

### 3.2.2.6 Función de Parada

En esta última función propia del algoritmo genético, se combina el criterio de límite de generaciones, y el de convergencia de la población, para el cual se impone que si la diferencia de las medias de costes en las trayectorias de una generación, entre una iteración y la siguiente, es menos que un determinado umbral, se detiene. Ese umbral se determina de forma empírica, considerando que para ello tendrá que tenerse que en ambas iteraciones la salida de la función objetivo que penaliza por atravesar continente o hielo es nula (es decir, que la solución es realizable), y por tanto el valor umbral es pequeño y se asocia a un coste económico de 35€.

## Capítulo 4 Resultados y Caracterización Estadística

En este capítulo se describen someramente los resultados de las simulaciones de optimización y se extraen algunas conclusiones a partir de un análisis sistemático de los parámetros del algoritmo de optimización, que son evaluados mediante un método sencillo de caracterización estadística. Se han analizado en profundidad 17 trayectorias completas y de una forma más superficial otras 2 ya que por erratas menores en el código (que fueron subsanadas sobre la marcha durante las optimizaciones), el barrido paramétrico no ha sido completado y/o no ha sido posible evaluar el mismo número de ejecuciones independientes del planificador (necesarias para poder calcular la desviación típica de la caracterización paramétrica).

### 4.1. Resultados

En la siguiente tabla se presentan los puertos orígenes y destino de las trayectorias que se desea optimizar, así como la distancia recorrida, por la mejor solución obtenida, en la zona prohibida de navegación (región continental y hielo real). Se incluye esta distancia en la tabla, ya que cuando en la mejor solución obtenida por el planificador ésta toma un valor nulo, la trayectoria es factible, mientras que en los escenarios en los que ésta toma valores positivos la mejor trayectoria transcurre sobre una zona no realizable. Es decir, esta distancia permite comprobar la capacidad del algoritmo para obtener soluciones factibles en cada uno de los escenarios, que como ya se comentó en las primeras secciones, constituye el principal reto de este proyecto.

| Puerto Origen           | Puerto Destino         | Distancia zonas prohibidas (km)  |
|-------------------------|------------------------|--|
| Buenos Aires (Arg.)     | Reikiavik (Islandia)   | 0.0  |
| Dubai (E.A.U.)          | Busán (Corea Sur)      | 0.0  |
| Estocolmo (Suecia)      | Rio de Janeiro (Bra)   | 0.0  |
| Gijón (Esp.)            | Busán (Corea Sur)      | 0.0  |
| Glasgow (R.U.)          | Shangai (China)        | 0.04   |
| Miami (EEUU)            | Nápoles (Italia)       | 0.0  |
| Miami (EEUU)            | Shangai (China)        | 10.39  |
| Nueva York (EE.UU.)     | Tokio (Japón)          | 34.76 (con mayor número de iteraciones que el resto de los escenarios) |
| Port Moresby (Papúa)    | Los Ángeles (EEUU)     | 0.0  |
| Puerto Armuelles (Pan.) | Tokio (Japón)          | 0.0  |
| Sidney (Australia)      | Bangkok (Tailandia)    | 0.0  |
| Singapur                | Dubai (E.A.U.)         | 0.0  |
| Singapur                | Nápoles (Italia)       | 0.0  |
| Tokio                   | Casablanca (Marruecos) | 4.3  |
| Singapur                | Reikiavik (Isl.)       | 0.0  |

|                      |                        |      |
|----------------------|------------------------|------|
| Vladivostok (Rusia)  | Adén (Yemen)           | 0.0  |
| Vladivostok (Rusia)  | Sebastopol (Rusia)     | 8.85 |
| Port Moresby (Papúa) | Casablanca (Marruecos) | 0.0  |
| Estocolmo (Suecia)   | Reikiavik (Isl.)       | 0.0  |

**Tabla 3 Listado de escenarios visitados y mejor resultado de factibilidad obtenido**

Se muestran a continuación algunos ejemplos gráficos de los tramos de mayor interés (por brevedad y para no perder detalle por alejamiento del zoom) de aquellas trayectorias de mayor relevancia para el estudio del comportamiento del algoritmo, bien porque no se haya convergido a una solución factible o porque, al contrario, se haya conseguido una trayectoria factible en un escenario complicado o singular (respecto a la combinación necesaria de parámetros con los que se consigue una buena convergencia).

La mayoría de las trayectorias se han evaluado para un máximo de 14 iteraciones, salvo aquellas que superan los 600 puntos de longitud, donde se tomó la decisión de aumentarlas a 18. Este número se ha fijado en valores aparentemente muy bajos fundamentalmente por un motivo, y es el hecho de que la complejidad de la función de mérito hace que su tiempo de ejecución por cada llamada oscile entre los 0.8 y 6 segundos, en función de la longitud de la misma, y sobre todo del hecho de que se atraviesen en ella zonas árticas, en las cuales para los puntos de la trayectoria que están en ella se calcula, de forma simplificada para no ralentizar aún más, las distancias a los contornos del hielo para modular velocidades y consumos de la forma en que se explicó en el Capítulo 2.

Así pues, aun siendo los tiempos de cálculo de los operadores genéticos mucho más abordables en general, al ser llamados estos solo una vez por iteración del GA frente a las 2.pobl\_ini, es decir 52 veces con el tamaño de población escogido, que se llama a la función de mérito, el tiempo de cómputo de cada llamada básica al GA en 14 iteraciones es de al menos 35-40 minutos.

A esto hay que sumar que cuando la trayectoria es difícil de convertir en factible, por haber muchos cortes con los contornos, el tiempo de cómputo también aumenta de forma apreciable, ya que la probabilidad de mutar los puntos cercanos a los de corte es, como se ha dicho, igual a 1. En estos casos, en el escenario NYC-Tokio con un número de 32 cortes y una trayectoria de 602 puntos, la función de generación tarda unos 2 minutos, la de mutación unos 4 segundos, por 35 la de corte y 5.9 la de coste, por lo que la llamada básica al GA se aproxima a cerca de 1.4 horas con las 14 iteraciones anteriores.

Además no se puede olvidar de contar la contribución al tiempo de cómputo del algoritmo A\*, que es el más costoso en cada llamada, aunque sólo se le llame una vez por escenario. Los tiempos de cómputo pueden ser del orden de 25-30 minutos para el A\* en trayectorias largas y complejas (recuérdese que es exponencial con el tamaño del problema), y además se le llama 2 veces en muchas de las trayectorias septentrionales que se han evaluado, bien sea adrede para profundizar en una de las ideas clave del TFM, o bien como resultado de una forma automática de correr el programa, en la que los puertos de la lista se iban combinando aleatoriamente y luego eliminándose de la lista.

Al haber un número importante de puertos septentrionales, ha sido habitual perder aún más tiempo en la ejecución del A\*, lo cual ha obligado a reducir el número de iteraciones a valores tan bajos. Aún así, la mayoría de escenarios visitados han obtenido una convergencia rápida a soluciones factibles, por lo que salvo en algunas excepciones, el resultado de las optimizaciones no se ha visto comprometido por este hecho.

Lo peor a lo que ha obligado esta evidente limitación computacional es que, por motivos de tiempo, el número de **iteraciones aleatorias necesario para la caracterización estadística ha tenido que reducirse a 2**, por lo que los datos de varianza representados pueden no tener siempre un significado físico concluyente. Aún así, cada escenario ha necesitado  $12 \times 2 = 24$  ejecuciones independientes del algoritmo genético, lo cual equivale a una media de algo menos de un día por CPU. Por tanto, teniendo en cuenta paralelizaciones el tiempo de cálculo para obtener la base de datos de trabajo ha sido de algo más de dos semanas.

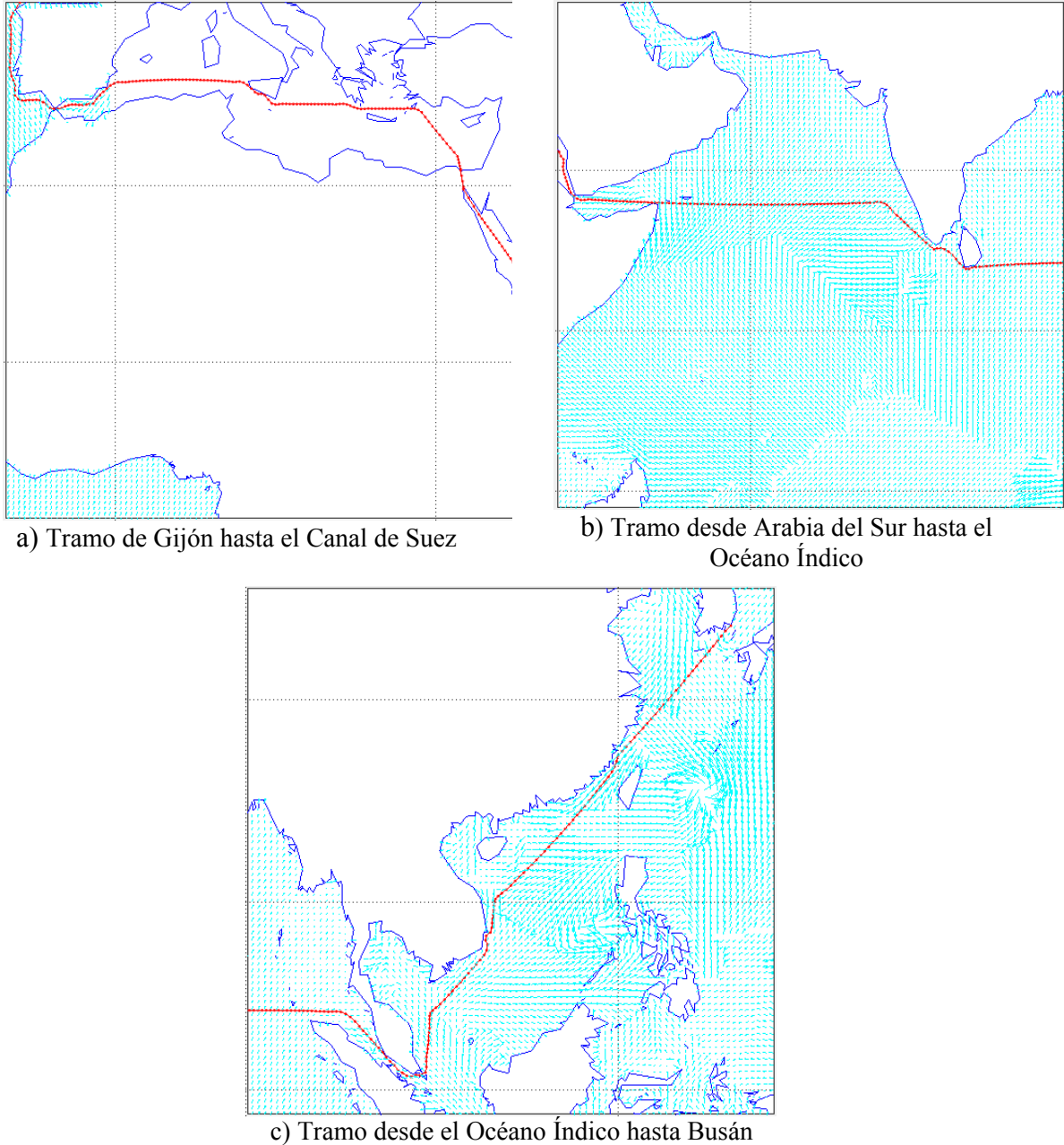
Los parámetros que se modifican a la hora de validar la herramienta son los siguientes: el número máximo de WPs intermedios (3 puntos que son los siguientes: 9, 16 y 22), la varianza del ruido gaussiano que se añade a la solución proporcionada por A\* durante la etapa de generación (2 valores: 0.05 y 0.1), y la amplitud de la mutación incremental (2 valores: 0.14 y 0.3). Por lo tanto, para evaluar cada escenario con una parametrización diferente, hay que realizar 12 llamadas al algoritmo genético de planificación sobre cada escenario, habiéndose utilizado dos ejecuciones aleatorias por falta de tiempo, y una importante lentitud en la ejecución.

A continuación, en la gráfica 20, se comienza presentando los resultados de una de las trayectorias que, a pesar de ser larga, y atravesar canales estrechos (como el de Gibraltar o Suez) y zonas con multitud de islas pequeñas (por ejemplo en Indonesia), ha sido exitosa en encontrar soluciones 100% factibles en el 66% de las combinaciones paramétricas. En particular se trata del recorrido Gijón-Busán (Corea).

Posteriormente, en la gráfica 21, se analizará la trayectoria que peores resultados ha arrojado (entre Nueva York y Tokio), debido a lo que ya se comentó como el principal obstáculo y dificultad para conseguir soluciones factibles: el contorno de hielo, especialmente enrevesado y con formas complejas como agujeros internos que aparecen en verano (por ejemplo, en la fecha 3 de Septiembre de 2017). Para este escenario, la mejor solución atraviesa unos 34.8 km de obstáculos, y aunque el algoritmo A\* habría seleccionado como mejor solución la alternativa de paso por el Canal de Panamá, esta no ha sido tomada en cuenta debido al hecho de que correr el A\* tanto con hielo real, como con el contorno artificial ya explicado, se obtienen dos trayectorias polares árticas (aunque distintas), mejores en distancia que el paso por el Canal. Además, cabe destacar que para esta solución en concreto se ha aumentado el número máximo de iteraciones (56), ya que existía un claro problema de velocidad de convergencia.

En los detalles de estas trayectorias que se aprecian en la gráfica 21, que a pesar de lo dicho anteriormente demuestran un funcionamiento muy prometedor del algoritmo en su conjunto, ya que si se compara la mejor trayectoria con la de partida del algoritmo (A\*), representada en negro, se aprecia que las zonas más complicadas del camino (detalle en la subfigura 21-b) son perfectamente sorteadas por el mecanismo de mutación. Sin embargo, el tamaño característico de la mutación que le ha permitido tener éxito en esa zona geográfica, puede explicar el fracaso relativo del GA en otras

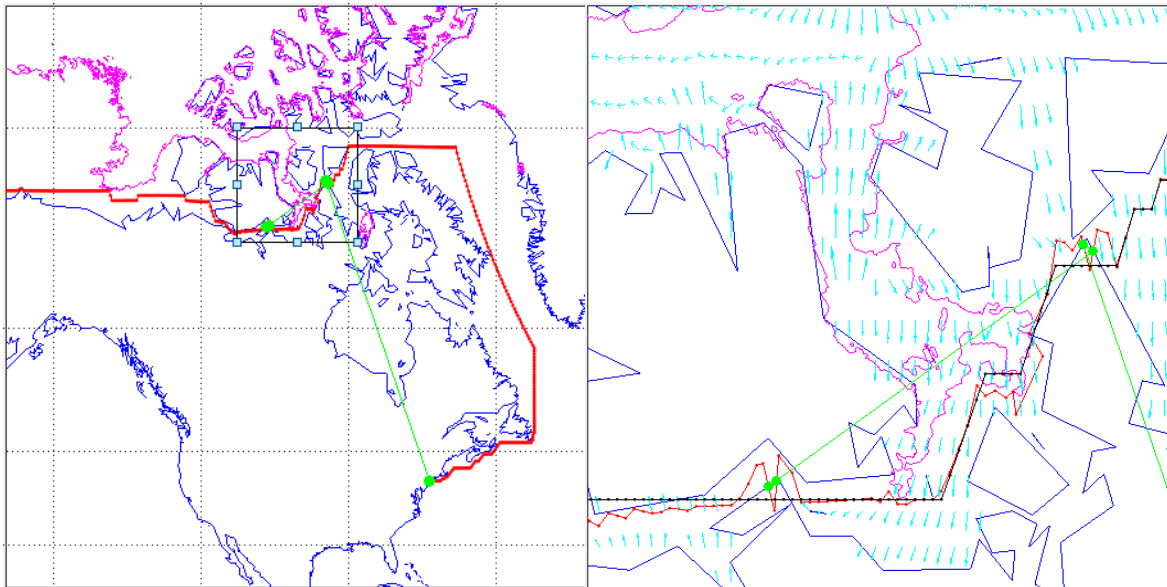
zonas de la misma trayectoria. Para evitar este problema, una mejora posible futura del TFM podría ser permitir el autoajuste del tamaño característico de las mutaciones para una misma trayectoria.



**Figura 20** Detalle de la trayectoria factible Gijón-Busan (12-9-17) con  $\sigma_{gen}=0.05$ , 16 WPs y  $\mu_{mut}=0.14$

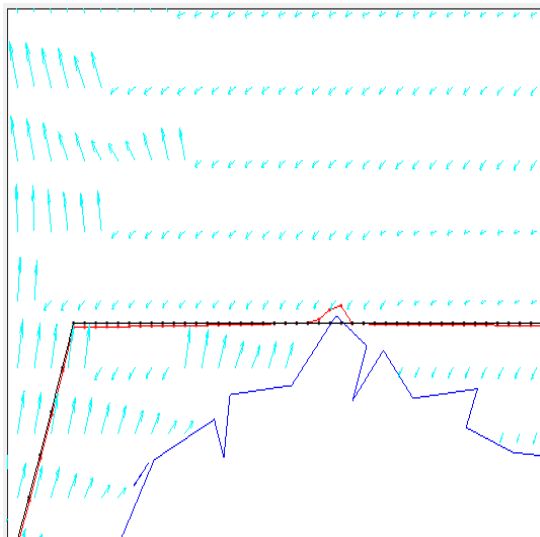
En la figura 21 también se observa que el primer corte (punto verde) de la trayectoria con el contorno es muy marginal y aparece al intentar sortear Long Island en la salida del puerto de Nueva York. Además el tramo asiático de la trayectoria, como se ve en la subfigura d) está libre de restricciones, por lo que lo más interesante es la zona ampliada en el rectángulo negro.

En (b) se aprecia como los mecanismos de mutación permiten (respecto al trazo negro, A\*) sortear la irregular lengua de hielo (magenta) que prácticamente está en contacto con la península de eje N-S cuyo exitoso bordeo se ve dificultado por el tamaño de la mutación. Sin embargo, en una zona más sencilla, como en (c) (Norte de Alaska), el bordeo es sencillo y efectivo

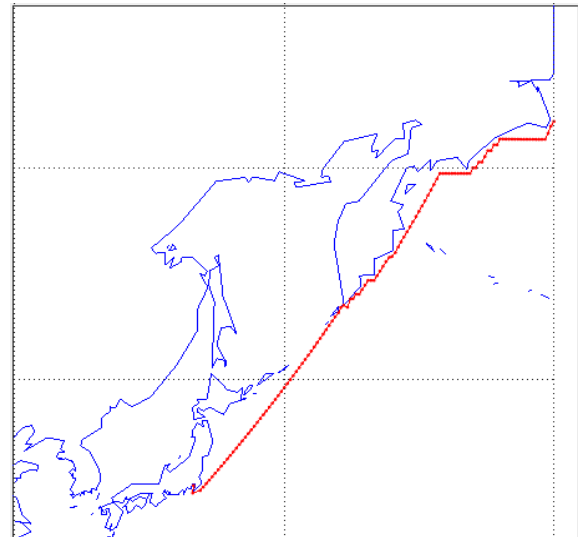


a) Tramo desde NYC hasta Alaska

b) Detalle del Archipiélago canadiense



c) Norte de Alaska



d) Este de Asia

**Figura 21** Detalle de la trayectoria (roja) no factible NYC-Tokio (3-9-17) con  $\sigma_{gen}=0.03$ , 16 WPs y  $\mu_{mut}=0.26$  y 56 iteraciones máximas

En un último esfuerzo por demostrar que el algoritmo tiene capacidades para converger a óptimos locales factibles, pero adolece de un problema de eficiencia computacional que deberá ser resuelto en futuros desarrollos, se han corrido 70 iteraciones máximas en un conjunto más reducido de variación de los parámetros del GA, hallándose una solución factible que se representa, focalizada en la zona del archipiélago ártico Canadiense, en la Figura 22.

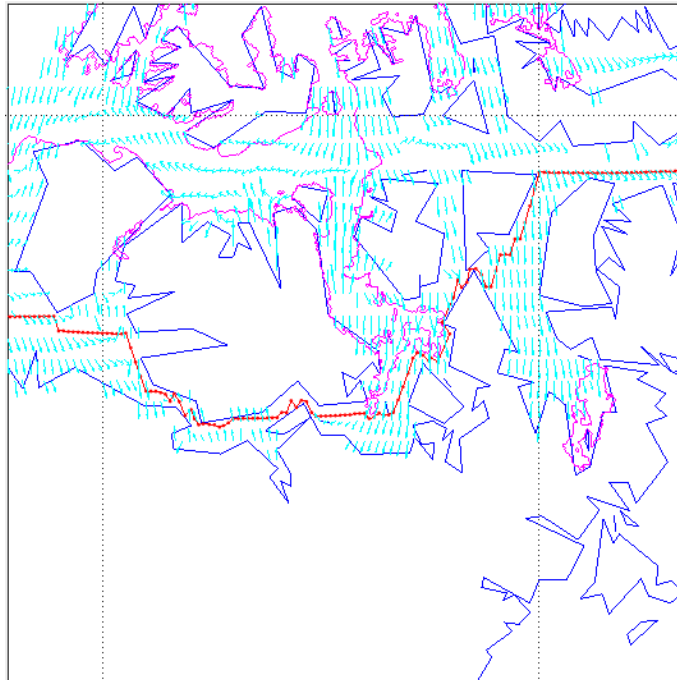


Figura 22 Trayectoria NYC-Tokio (en rojo) factible tras 70 iteraciones con  $\sigma_{gen}=0.03$ , 16 WPs y  $\mu_{mut}=0.26$

Otro ejemplo de trayectoria no factible, aunque en menor medida que la anterior (con el número estándar de iteraciones), es el que constituye el intento de unión de los puertos de Vladivostok y Sebastopol (Península de Crimea), ambos en Rusia. La trayectoria atraviesa sin problemas el Canal de Suez, y los únicos cortes con la costa se encuentran en el Mar Egeo y el Estrecho de los Dardanelos (para pasar al Mar Negro), por lo que sólo se incluye ese detalle en la Figura 23.

En ella se observan como cuatro pequeñas islas de tamaño característico mucho menor que el paso de la trayectoria son atravesadas (la primera de ellas, viniendo desde el Sur, Kos). Sin embargo, el problema más importante ocurre en la embocadura de los Dardanelos (Turquía), que la mutación no consigue superar de forma correcta, ya que la Península de Galípoli se atraviesa perpendicularmente por su estrecho istmo (8 km). La conclusión inmediata es que los Dardanelos son tan estrechos que lo más efectivo sería tratarlos como a los Canales artificiales tratados en el TFM: es decir suprimiendo la varianza y mecanismos evolutivos entre WPs adyacentes al accidente geográfico, y obligando a todas las trayectorias de la población a pasar por un tramo construido de forma manual.

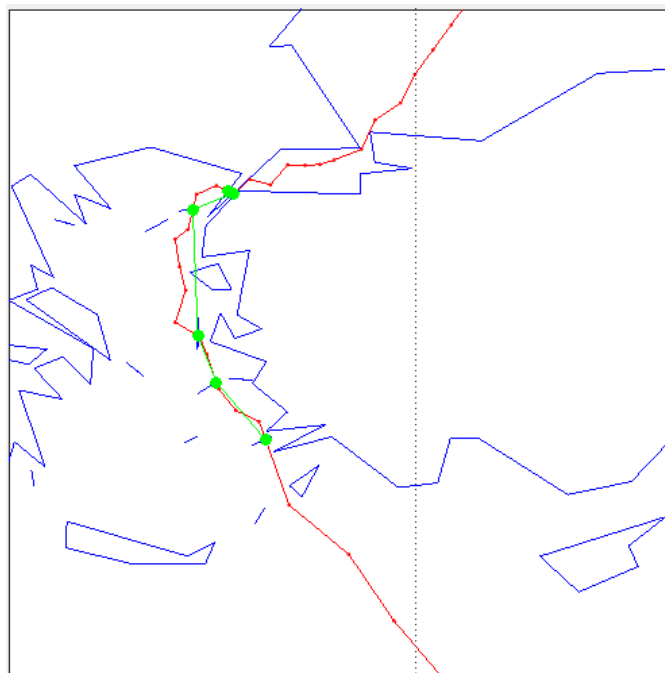


Figura 23 Detalle de la trayectoria (roja) no factible Vladivostok-Sebastopol (12-9-17) con  $\sigma_{gen}=0.05$ , 22 WPs y  $\mu_{mut}=0.14$

## 4.2. Caracterización Estadística

En esta sección se recogen los resultados del estudio estadístico de la convergencia del algoritmo frente al número de iteraciones, tanto respecto al coste total de la trayectoria como respecto a la distancia recorrida por zonas de restricción. Además, como se lanzan varias ejecuciones sobre cada escenario (mientras se hace el barrido paramétrico), el análisis muestra el valor medio obtenido por todas las ejecuciones y su desviación estándar.

Respecto a los parámetros analizados, ya se ha comentado que se trata de varianza en las gaussianas aplicadas en la generación inicial sobre las soluciones propuestas por el algoritmo A\*, el número de WPs y la amplitud de las mutaciones, tanto forzadas por cortes con contornos, como puramente aleatorias en zonas libres de restricciones. También se ha hablado de los rangos en que se dejarán variar, pero ahora se incidirá qué se controla exactamente con las magnitudes de la primera y tercera variable, ya que el significado de la segunda es mucho más clara.

En efecto, la varianza utilizada en la etapa de generación afecta, como ya se ha indicado geoméricamente, a la máxima distancia en perpendicular a la salida del A\*, que alcanzan los arcos aproximadamente parabólicos formados en los tramos delimitados por WPs. Esta distancia equivalente, ajustada en sus rangos de manera puramente gráfica por prueba y error, afecta a la distancia en perpendicular en cada punto del tramo en cuestión según la siguiente expresión:

$$\left\{ \begin{array}{l} dist_{parab_{\max(m)}} = \text{sign}[0.5 - U(0.1)] \cdot U(0,1) \cdot f \cdot \frac{|m \cdot (m - (1 + \text{numel}(A_{A^*_{W_p}}^{W_{p+1}})))|}{g[\text{mean}(m)_{A^*_{W_p}}^{W_{p+1}}]} \\ f = \min\left(15^\circ, \text{ang}_{\text{ortodrm}(A^*_{W_p}^{W_{p+1}})}\right) \\ g \text{ es la misma función de } m \text{ que en el numerador, evaluada en un valor medio} \end{array} \right.$$

Algo similar ocurre en el factor de mutación, aunque el significado físico del mismo es más inmediato, siendo directamente los grados angulares, medidos a lo largo de un círculo máximo lanzado en la dirección acimutal en la que se lanza la mutación (mecanismo explicado en el Capítulo 3), que se van a mover los puntos mutados.

Las 12 combinaciones de estos parámetros, que determinan un idéntico número de llamadas al GA, son 2 varianzas en la generación en los extremos del rango [0.05-0.1] (salvo para la trayectoria Nueva York-Tokio cuyo valor inferior vale 0.03 y donde se ha hecho un análisis con más iteraciones en una combinación paramétrica más precisa donde la convergencia era buena), 3 números de WPs máximos que pueden valer 9, 16 o 22, y el rango de mutación entre 0.14 y 0.3° de longitud-latitud equivalente medida sobre el círculo máximo.

Cada color es, en cada gráfica, indicativo de una combinación de los parámetros relevantes que se acaban de explicar, y los trazos continuos representan la evolución de la media de la función de coste (o bien la distancia recorrida por zona restringida) con las generaciones, mientras que el sombreado a su alrededor indica la varianza de dicha distribución. Para no obtener gráficas con 12 colores y sus respectivas bandas de varianza asociadas, en las que no es fácil extraer tendencias de los efectos de los parámetros en la convergencia, se ha separado el estudio, para cada escenario visitado en dos gráficas, una con 6 evoluciones correspondientes a la menor varianza de generación, y otra con las otras de la varianza mayor.

Los resultados son los siguientes, centrandos el análisis en la caracterización de distancia por restricciones, cuya convergencia a cero es el objetivo principal.

### Escenario Buenos Aires - Reikivaik

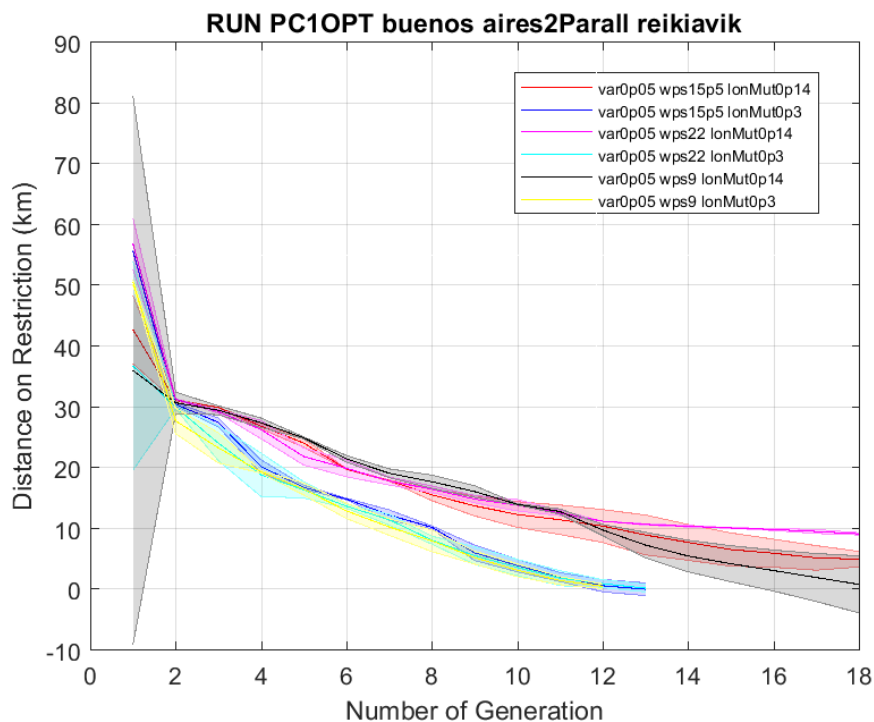


Figura 24 Media y varianza de la Penalización. B.Aires-Reikiavik, Vargen=0.05

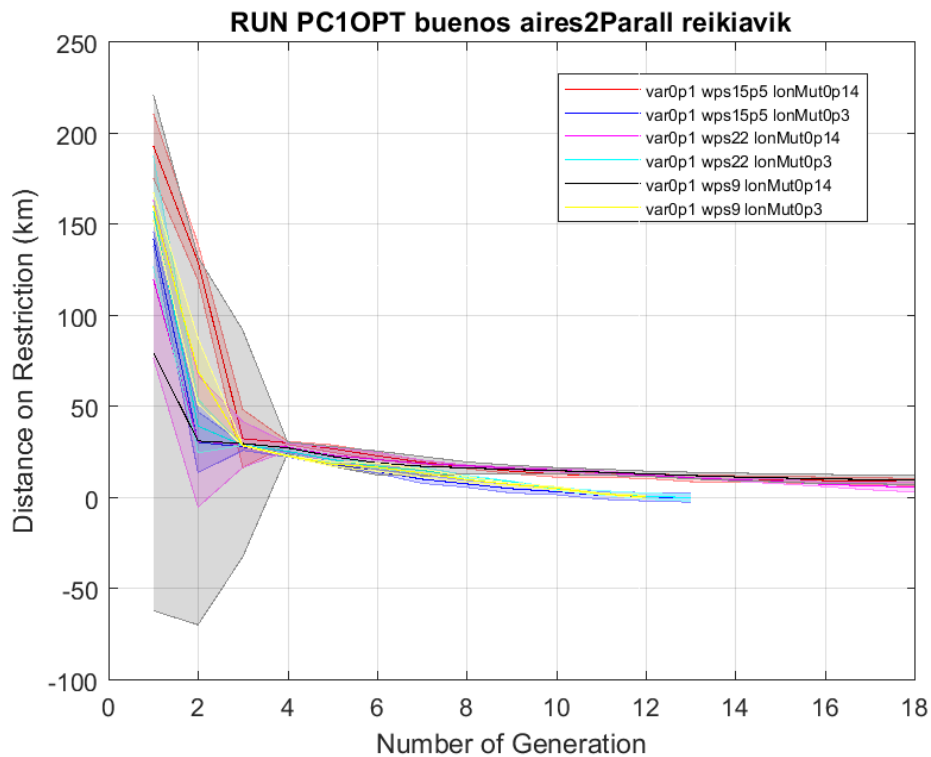


Figura 25 Media y varianza de la Penalización. B.Aires-Reikiavik, Vargen=0.1

Se aprecia a primera vista, y se anticipa que será una tendencia generalizada para todas las trayectorias estudiadas, que con el valor pequeño de varianza de generación (0.05

frente a 0.1) se obtienen convergencias mucho mejores, con una media del coste de penalización más bajo, varianzas más estrechas, y habitualmente convergencia hasta parada en un menor número de iteraciones. Lo más representativo de este escenario en concreto es que el comportamiento es mucho mejor para las curvas amarilla, cian y azul, es decir aquellas que tienen en común el mayor valor de banda de mutación: 0.3. De hecho se aprecia que con el valor pequeño de la mutación, la media del coste de penalización no converge a 0 (aunque hay individuos que sí lo hacen), cosa que sí sucede con  $\mu_{mut} = 0.3$ . Respecto a la varianza, es inicialmente mucho mayor en el caso de  $N_{WP} = 15 / \mu_{mut} = 0.3$ , y se puede ver que converge rápidamente a valores pequeños que se mantienen casi estables en 2 a 4 generaciones (más rápido para la varianza pequeña). Además, en el caso de mínima varianza, mínimo  $N_{WP}$  y mínima banda de mutación, se puede apreciar, en las generaciones finales, una convergencia de la media más rápida que para el resto de individuos con mutación pequeña, pero una varianza  $\sigma$  que comienza a crecer a partir de la generación 12, aunque de forma controlada.

## Escenario Dubai - Busan

En las gráficas siguientes de este escenario se aprecia que la convergencia a solución factible se obtiene para todas las familias de parámetros, aunque sigue siendo más rápida para la menor varianza, no siendo aquí posible extraer una tendencia clara en cuanto a calidad de la convergencia relacionada con el tamaño de mutación. Para la varianza pequeña, la convergencia más rápida se obtiene con 16 WPs y tamaño de mutación grande, mientras que para la mayor varianza, lo es la combinación de 9 WPs y mutación pequeña. Respecto a la varianza, en todos casos converge a prácticamente cero, siendo inicialmente mayor, en ambas varianzas, para el número intermedio de way-points.

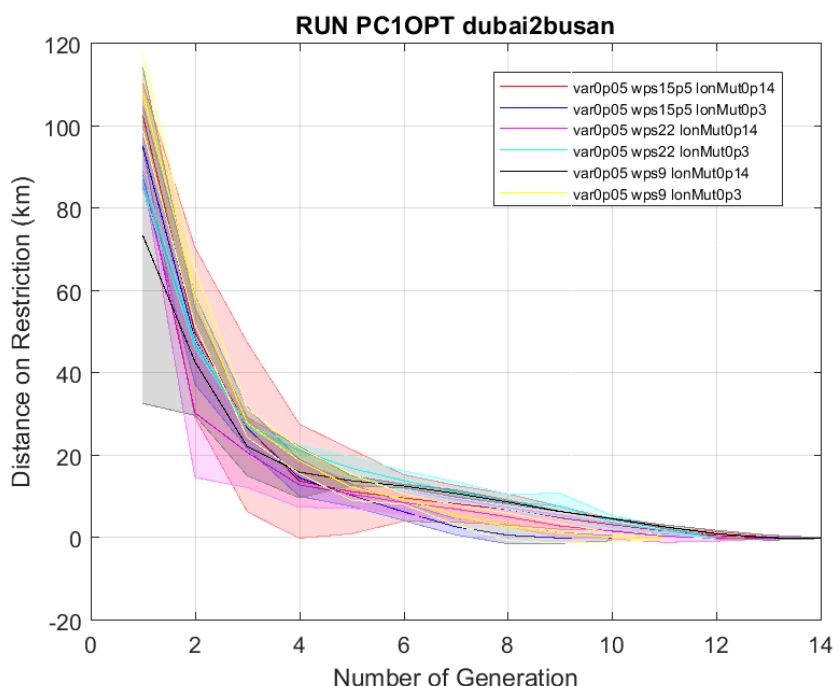


Figura 26 Media y varianza de la Penalización. Dubai-Busan, Vargen=0.05

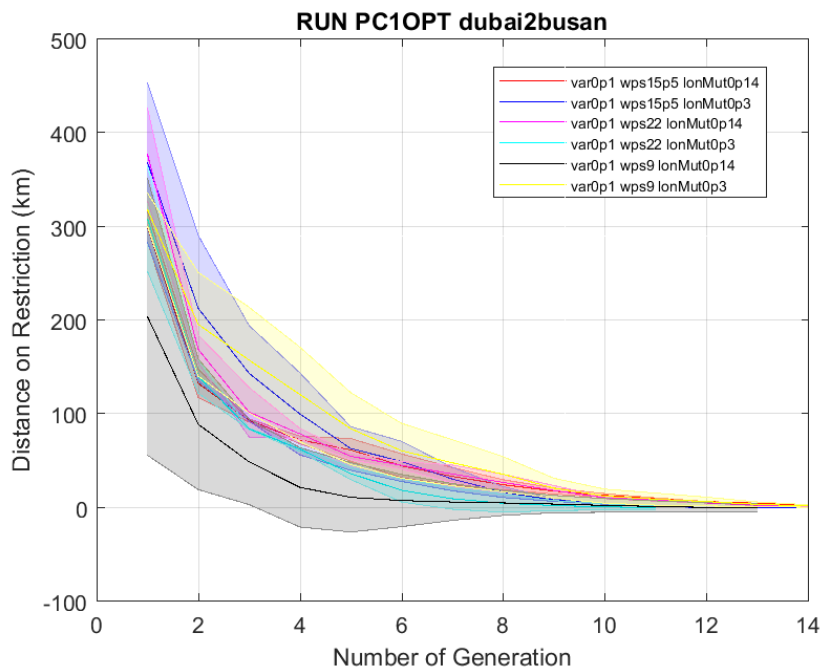


Figura 27 Media y varianza de la Penalización. Dubai-Busán, Vargen=0.1

### Escenario Estocolmo - Río de Janeiro

El comportamiento de este escenario en cuanto convergencia de las medias y evolución de las varianzas es prácticamente idéntico al de la trayectoria anterior, Dubai-Busan.

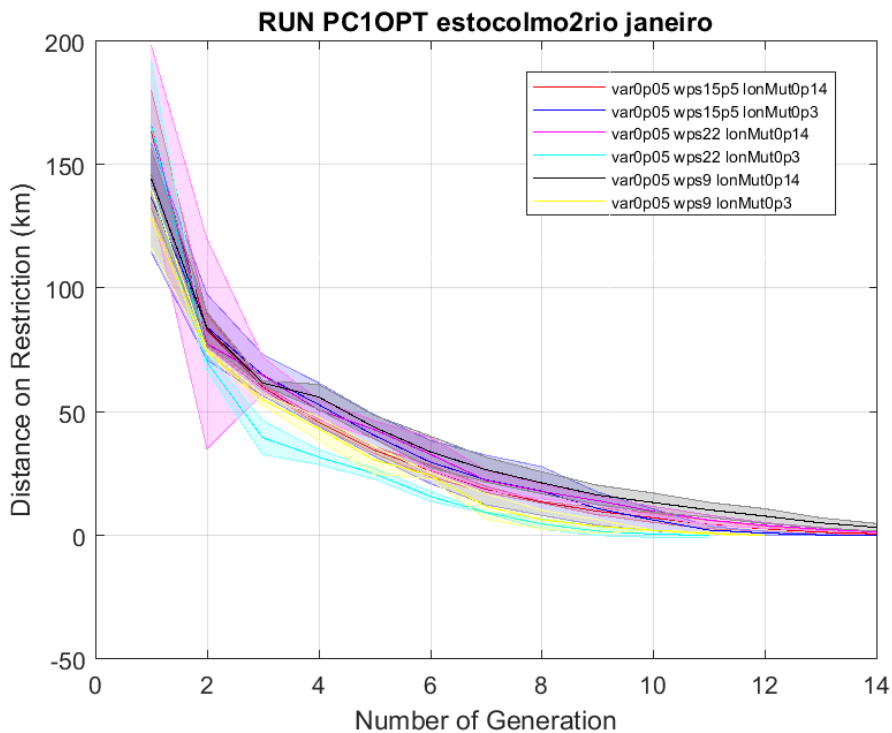


Figura 28 Media y varianza de la Penalización. Estocolmo-R.Janeiro, Vargen=0.05

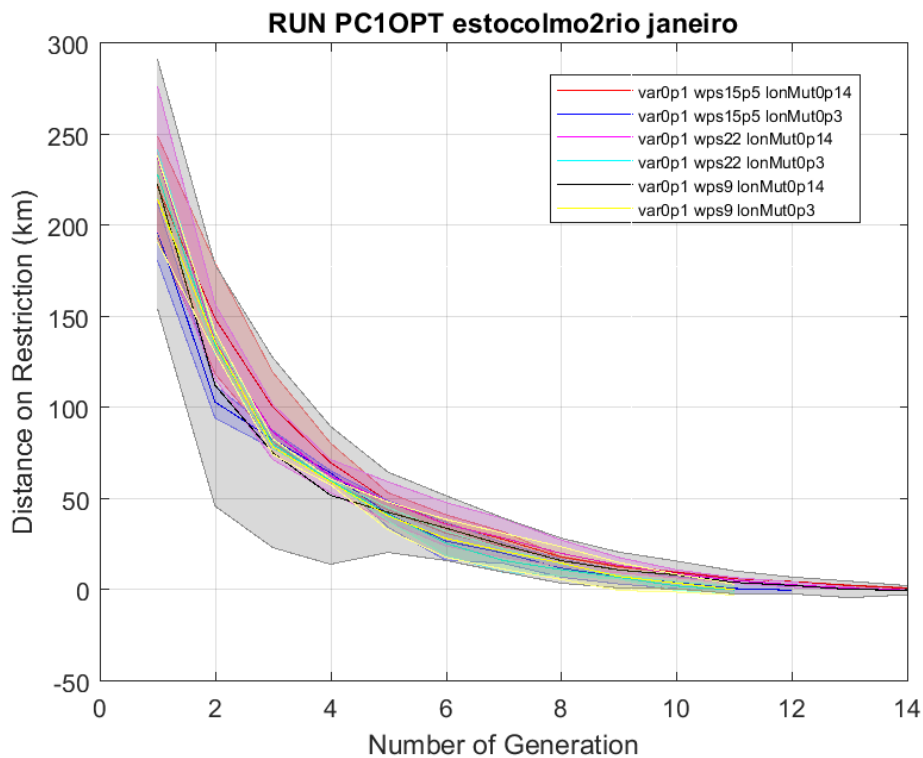


Figura 29 Media y varianza de la Penalización. Estocolmo-R.Janeiro, Vargen=0.1

### Escenario Gijón – Busán

En las gráficas de este escenario, para el caso de varianza 0.05, se aprecia un comportamiento marcadamente peor para el número mínimo de WPs, igual a 9, siendo claramente mejor el comportamiento a medida que aumenta este parámetro, y también el valor de la mutación. En este último caso, con 22 WPs y  $\mu_{mut} = 0.3$ , la varianza es más grande que en el resto, aunque al haber sido calculada con sólo dos ejecuciones independientes, no es en general un parámetro muy relevante. Sin embargo, este comportamiento no se produce en la Figura 31, donde también es la combinación con 22 WPs y  $\mu_{mut} = 0.3$  la que mejor converge, pero con una dispersión más reducida. Además, en este caso los peores resultados no se dan con el número mínimo de WPs, sino con 16 y tamaño de mutación mínimo.

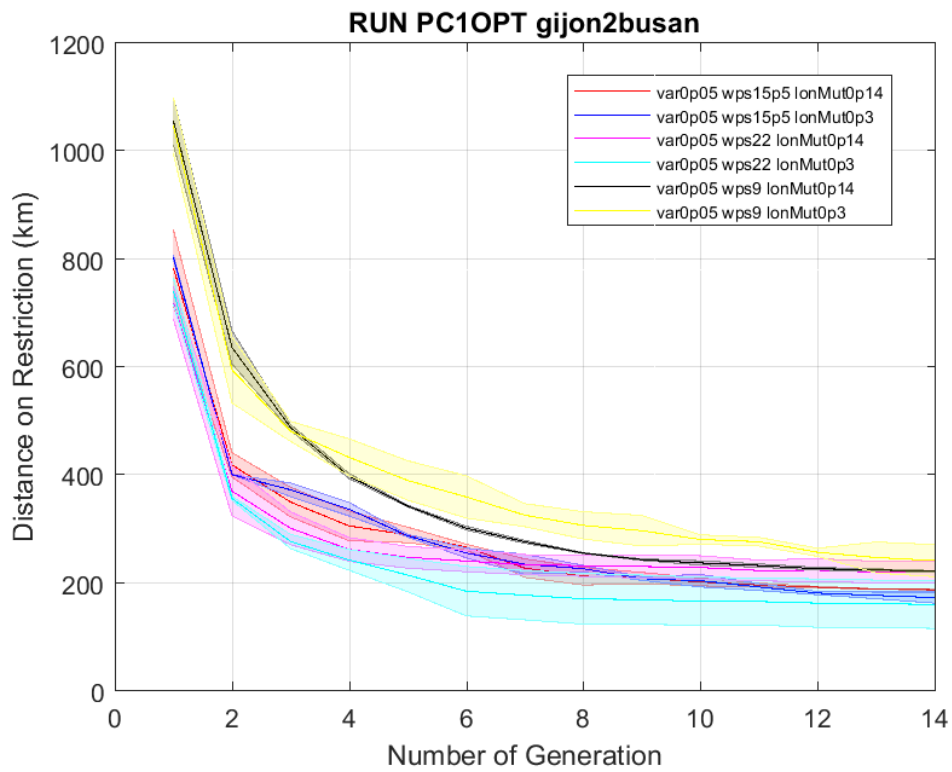


Figura 30 Media y varianza de la Penalización. Gijón-Busan, Vargen=0.05

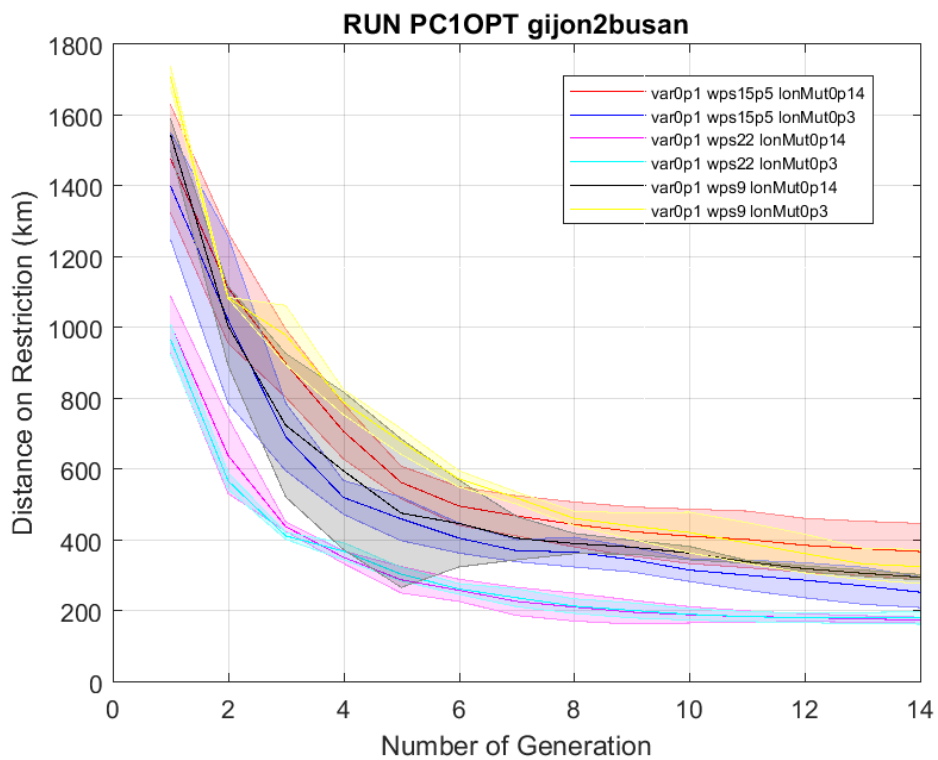


Figura 31 Media y varianza de la Penalización. Gijón-Busan, Vargen=0.1

### Escenario Glasgow - Shanghai

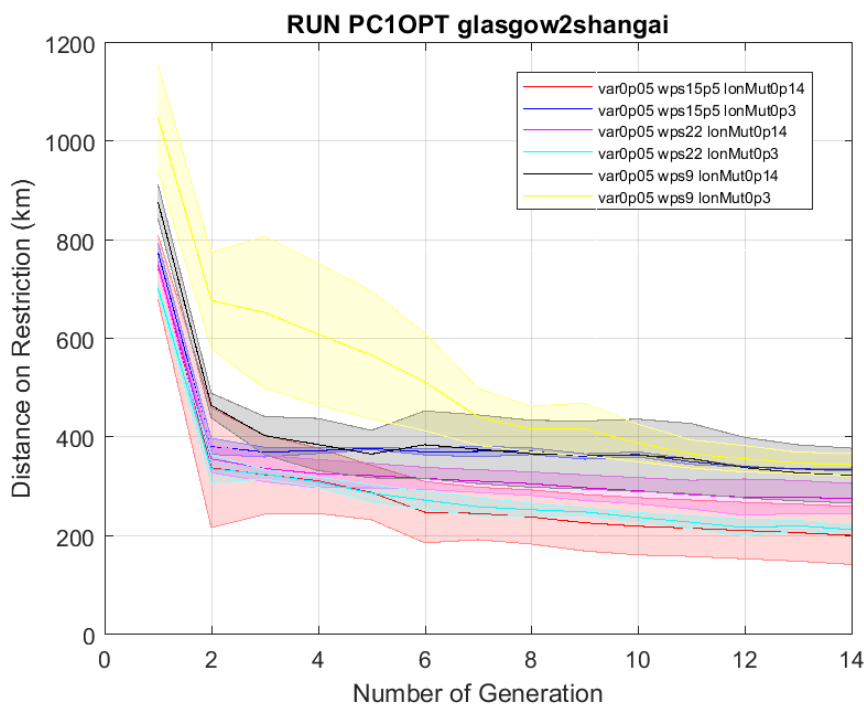


Figura 32 Media y varianza de la Penalización. Glasgow-Shangai, Vargen=0.05

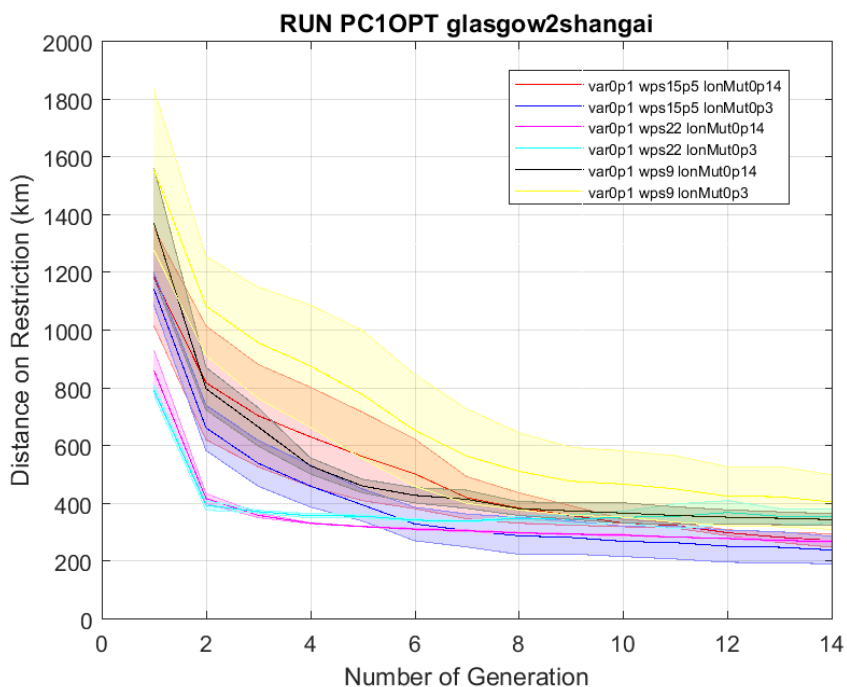


Figura 33 Media y varianza de la Penalización. Glasgow-Shangai, Vargen=0.1

Aunque en esta trayectoria también se han encontrado individuos prácticamente factibles (0.04 km de penalización), los resultados globales de convergencia no son buenos por falta de iteraciones, que como ya se ha comentado han tenido que ser

limitadas por el costo computacional del GA. Para ambas varianzas de generación, las dos familias con el máximo número de way-points (22) son las que mejor comienzan el proceso evolutivo, pero en el caso de varianza igual a 0.1, la convergencia de la familia con número intermedio de WPs y máximo tamaño de mutación acaba teniendo un valor de penalización media mejor que el resto. La peor combinación es claramente, en ambos casos, la del número mínimo de WPs y ventana de mutación grande.

### Escenario Miami - Nápoles

Esta trayectoria es muy fácil de optimizar en términos de hacer desaparecer el paso por restricciones, pues como se ve, entre la tercera y séptima generación, todas las familias paramétricas alcanzan el criterio de parada (variación de coste medio menor que 35€ entre una generación y la siguiente), el cual sólo se puede satisfacer una vez escapadas las trayectorias de la zona no factible. Allí donde el trazo desaparece abruptamente, por ejemplo en el caso rosa (varianza 0.05, 16 WPs y  $\mu=0.14$ ), es porque en la siguiente generación (la cuarta en este caso), el siguiente valor, tanto de media como de varianza (ocurre en las dos ejecuciones independientes) es 0. Desde un punto de vista de comparación de las distintas combinaciones de parámetros, es inmediato deducir que la mejor de ellas es en este caso la de número intermedio de way-points y tamaño grande de mutación.

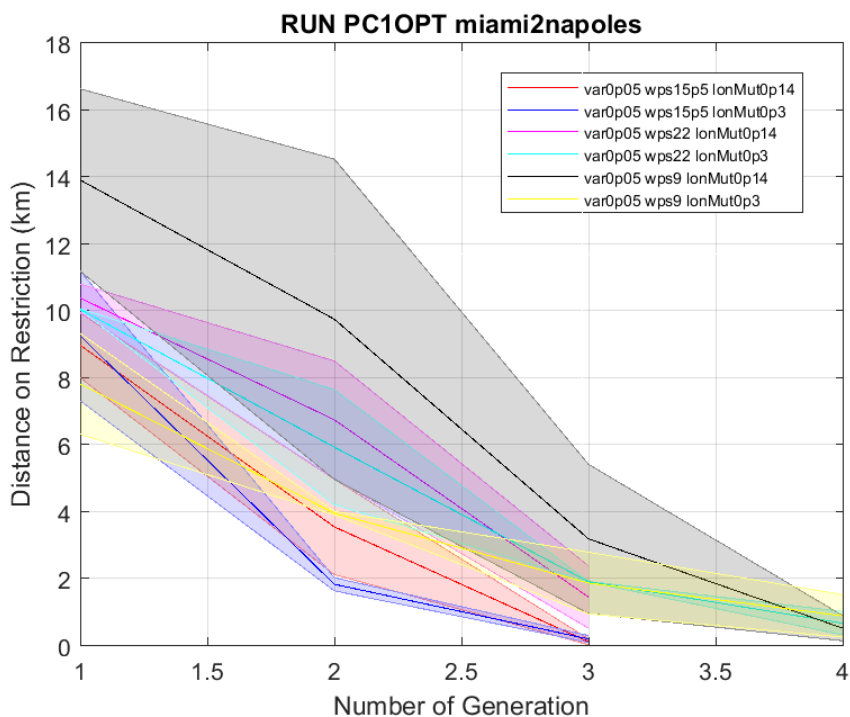


Figura 34 Media y varianza de la Penalización. Miami-Nápoles, Vargen=0.05

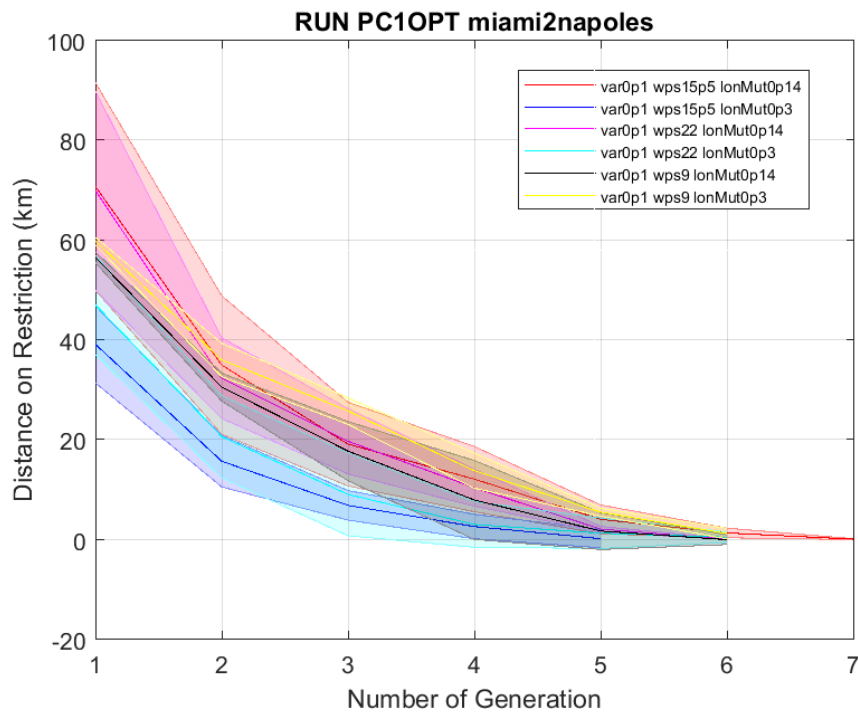


Figura 35 Media y varianza de la Penalización. Miami-Nápoles, Vargen=0.1

### Escenario Pt-Moresby - Los Ángeles

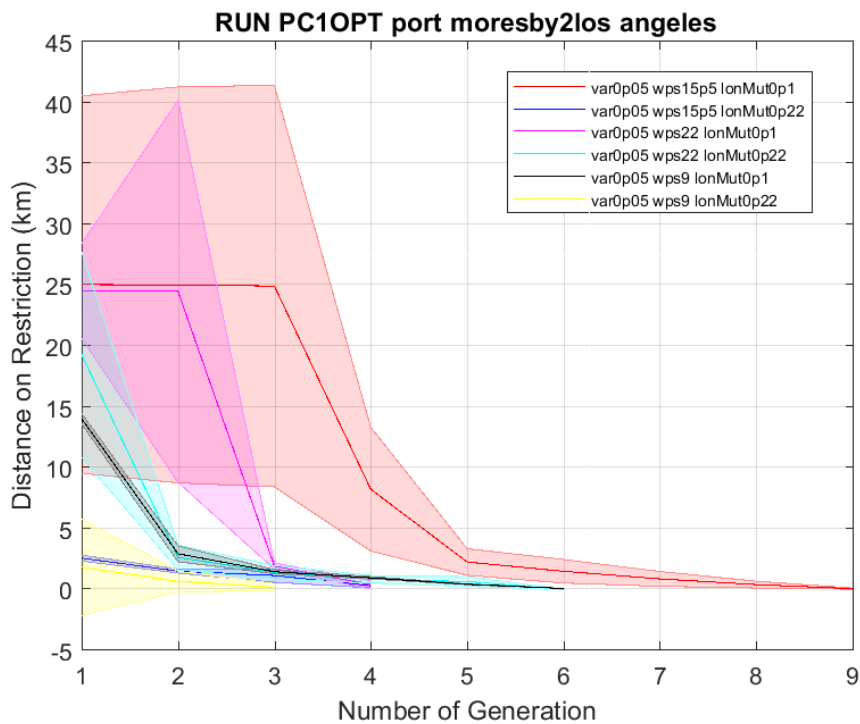


Figura 36 Media y varianza de la Penalización. PtMoresby-Los Ángeles, Vargen=0.05

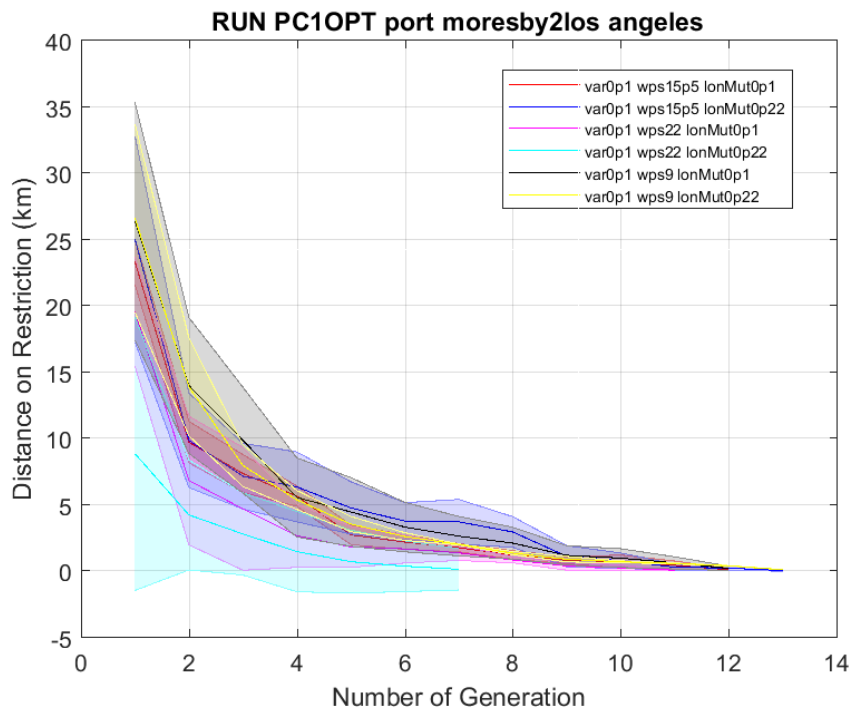


Figura 37 Media y varianza de la Penalización. PtMoresby-Los Ángeles, Vargen=0.1

La situación es muy similar a la del escenario anterior, ya que se trata de una trayectoria fácil de optimizar en términos de factibilidad, ya que la mayoría del espacio entre ambos puertos es océano abierto sin restricciones. Se aprecia como curiosidad que en este caso la varianza de generación grande apenas aumenta los valores iniciales de media de penalización, aunque sí tiene un efecto negativo en la velocidad de convergencia, alcanzada globalmente como tarde en la generación 9 para la varianza de 0.05, y para la 13 con varianza igual a 0.1. La convergencia se ve muy favorecida por el mayor tamaño de la ventana de mutación.

### Escenario Pt-Armuelles - Tokio

En las gráficas de este escenario se observa una convergencia muy uniforme, con varianzas que tienden rápidamente a 0, sobre todo en el caso de varianza de generación mínima, y se alcanzan soluciones realizables en todos los casos. Respecto a comportamiento referente a los parámetros, destaca para la varianza grande (0.1), el máximo número de WPs (22), y para la pequeña (0.05) el número intermedio (16). Se deduce de aquí una tendencia general que se repetirá en las conclusiones una vez explicados todos los escenarios, y es el hecho de que en las trayectorias cortas o fáciles por no tener apenas obstáculos (la que se analiza ahora es de las segundas), no es conveniente fijar un número muy grande de WPs ya que no son necesarios para ayudar a sortear obstáculos, y lo único a lo que contribuyen es a dar poca rigidez a las trayectorias, lo cual dificulta su adecuada convergencia al óptimo local.

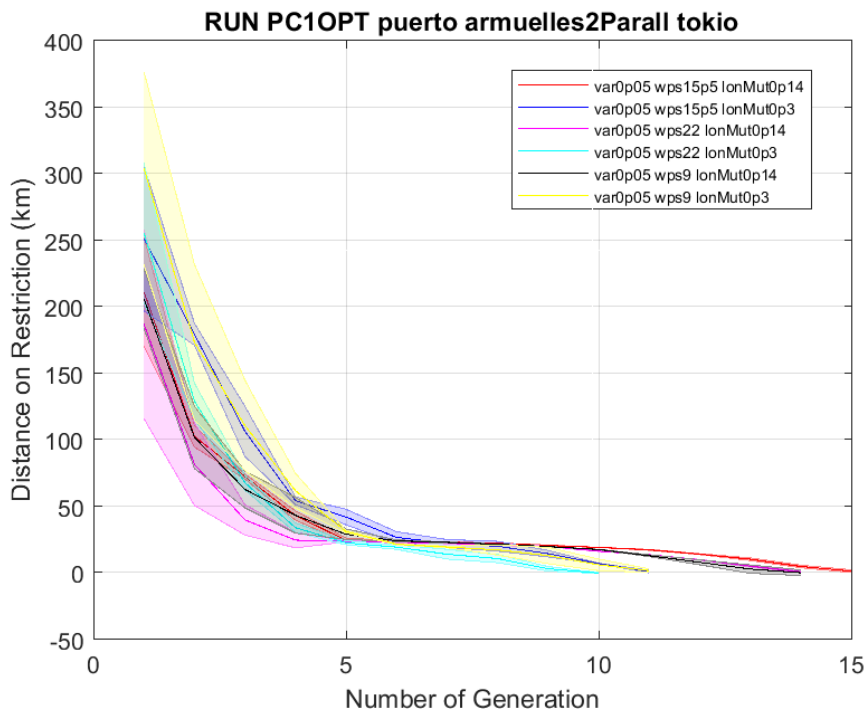


Figura 38 Media y varianza de la Penalización. PtArmuelles-Tokio, Vargen=0.05

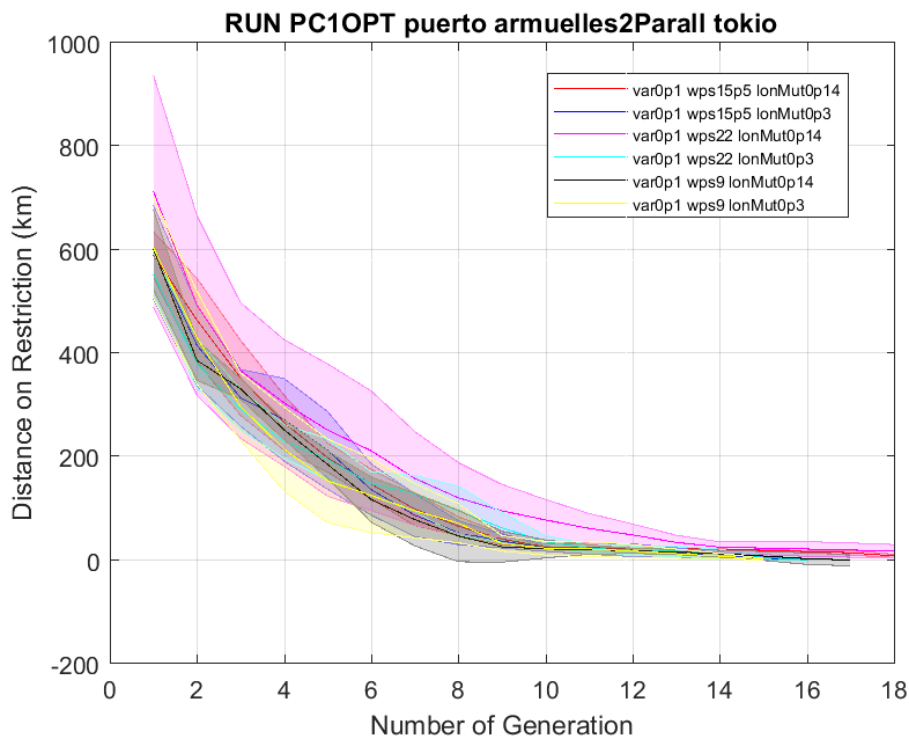


Figura 39 Media y varianza de la Penalización. PtArmuelles-Tokio, Vargen=0.1

### Escenario Sidney - Bangkok

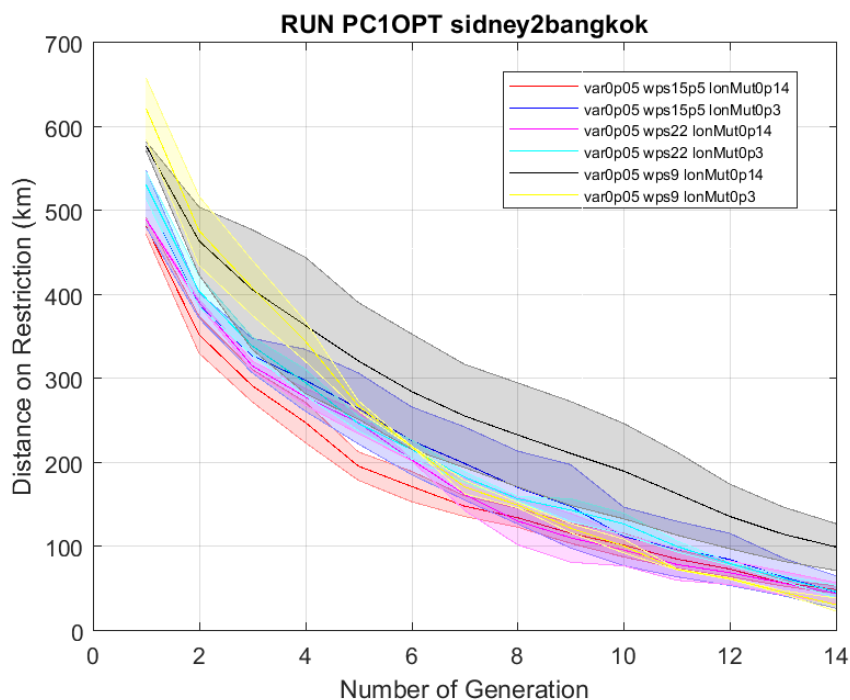


Figura 40 Media y varianza de la Penalización. Sidney-Bangkok, Var\_gen=0.05

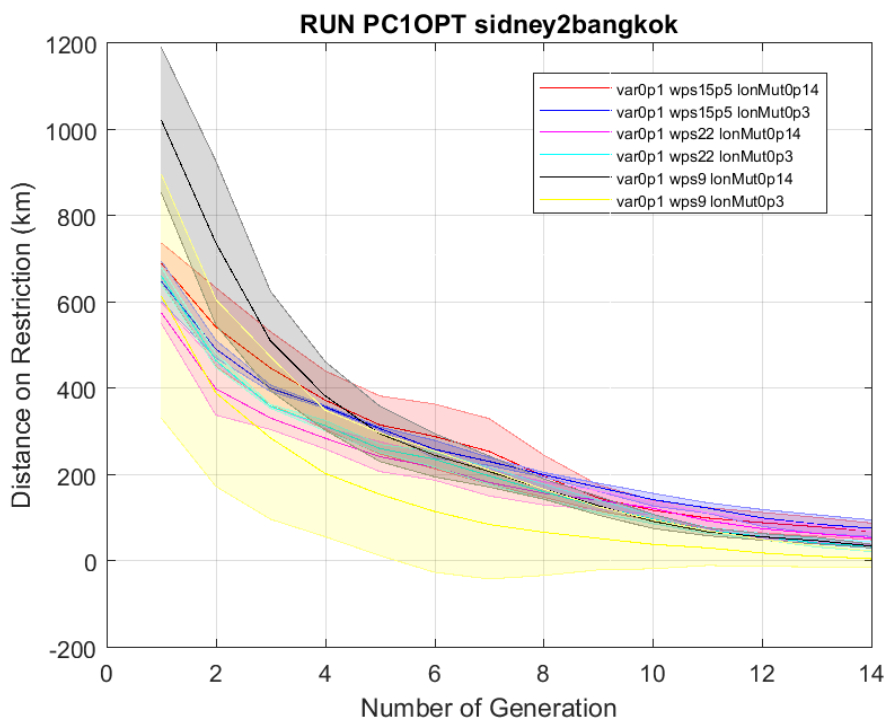
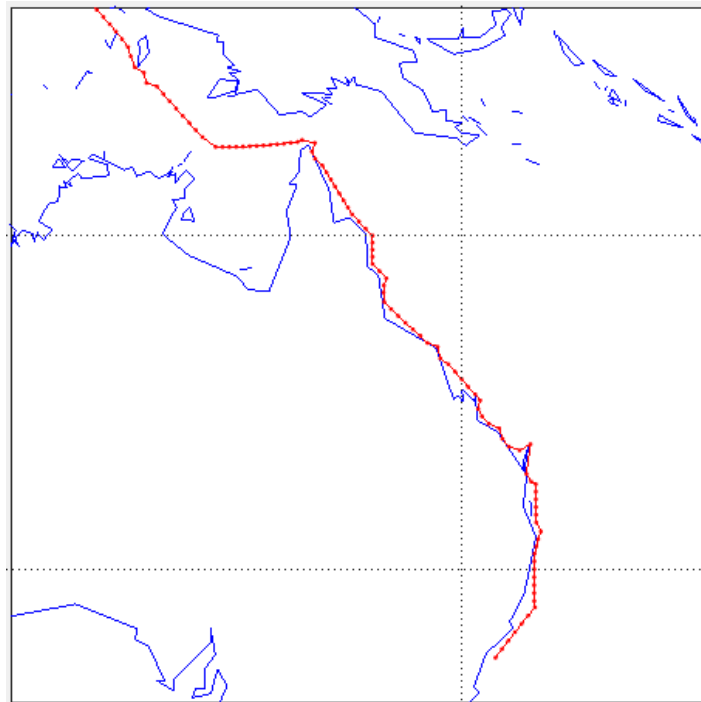


Figura 41 Media y varianza de la Penalización. Sidney-Bangkok, Vargen=0.1

En este caso se aprecia que el peor comportamiento paramétrico, especialmente para varianza pequeña, se da para el mínimo número de WPs, sobre todo con tamaño de

mutación pequeño. Esto es así porque la trayectoria tiene una particularidad, y es el enorme tramo de cabotaje en paralelo a las costas del este de Australia, como se puede ver en la figura 42. Ante este tipo de trayectorias, es ventajoso tener un número alto de WPs, ya que en caso contrario la función de generación tenderá progresivamente a establecer sólo uno en una zona intermedia del tramo de cabotaje, lo cual, unido a pequeñas mutaciones, aumentará el número de cortes con el contorno y dificultará el sortearlos eficientemente.



**Figura 42 Solución óptima Sidney-Bangkok, beneficiada por un alto número de WPs par cabotar eficientemente a lo largo de la costa de Australia**

### Escenario Singapur - Nápoles

En las gráficas de este escenario se presenta una situación novedosa, y es el hecho de que existe una práctica exclusividad paramétrica para poder converger hacia soluciones factibles. En efecto, con el número máximo de WPs, igual a 22, la convergencia a penalización cero es mucho más rápida, y en el caso de la varianza de generación grande, sólo se obtiene con ese parámetro. Para la varianza pequeña también converge la curva amarilla, que es la correspondiente al mínimo número de WPs y máximo tamaño de mutación.

Para entender esto podemos acudir a una explicación geométrica, relacionada con la funcionalidad de reconstrucción de trayectoria en el entorno de los Canales de Suez y Panamá, usada en la función de generación del GA. En efecto, para obligar a que las trayectorias que así lo necesitan pasen por los canales sin grandes penalizaciones por no hacerlo de forma precisa por su estrecho conducto, esta funcionalidad modifica la posición de los WPs originales más cercanos al canal en caso de que estos estén en el

interior del continente, y enlazan los tramos viejos de trayectoria con los nuevos creados por la función de reconstrucción.

Una situación habitual es que cuando existen pocos WPs por decisión del usuario, el siguiente WP con el que se tiene que enlazar el tramo rígido de trayectoria para pasar por el canal está muy lejos del mismo, por lo que los tramos rectos con los que se realizan estos empalmes (así diseñados con la idea de que las distancias serían cortas), tienen una alta probabilidad de entrar en zona restringida. Esto es lo que está sucediendo de hecho en la curva amarilla de la Figura 43, donde esas zonas prohibidas dentro del continente (al reconstruir la trayectoria respecto a la salida de A\* para paso por el Canal de Suez) tienen posibilidades de ser corregidas por el mecanismo de mutación al tener este asociado en ese caso su tamaño máximo.

También se entiende que en este caso ayude la varianza de generación mínima, pues en el caso de la máxima (amarillo de la Figura 44), los tramos por zona prohibida son mayores, y ni siquiera un buen tamaño de mutación los puede salvar.

Este comportamiento sugiere sin duda una posible acción de futura mejora, relacionada con el hecho de introducir WPs adicionales cercanos a los canales en la función de reconstrucción cuando el empalme de un tramo rígido de trayectoria con el siguiente WP supera un cierto umbral de distancia. En la Figura 45 se pueden observar resultados de la función de generación en este escenario, con 16 y 22 números máximos de WPs respectivamente, apreciándose que con 16 puntos se produce un empalme recto del canal con un WP alejado, al sur de Grecia, y que hace que las trayectorias<sup>20</sup> corten la isla de Creta.

La conclusión obvia es que cuando de antemano se sabe que una trayectoria va a pasar por un canal, y sobre todo si la misma es larga, es conveniente seleccionar un número elevado de WPs, al menos 20.

---

<sup>20</sup> Esto es así, por desgracia en este caso, para todas las generadas en la población, pues ese tramo de empalme con el siguiente WP forma parte de la parte "rígida" de una trayectoria, así diseñado con la idea de que siempre esté muy cercano al canal y asegure el paso fino a través de su interior, independiente de varianzas de generación y mutaciones.

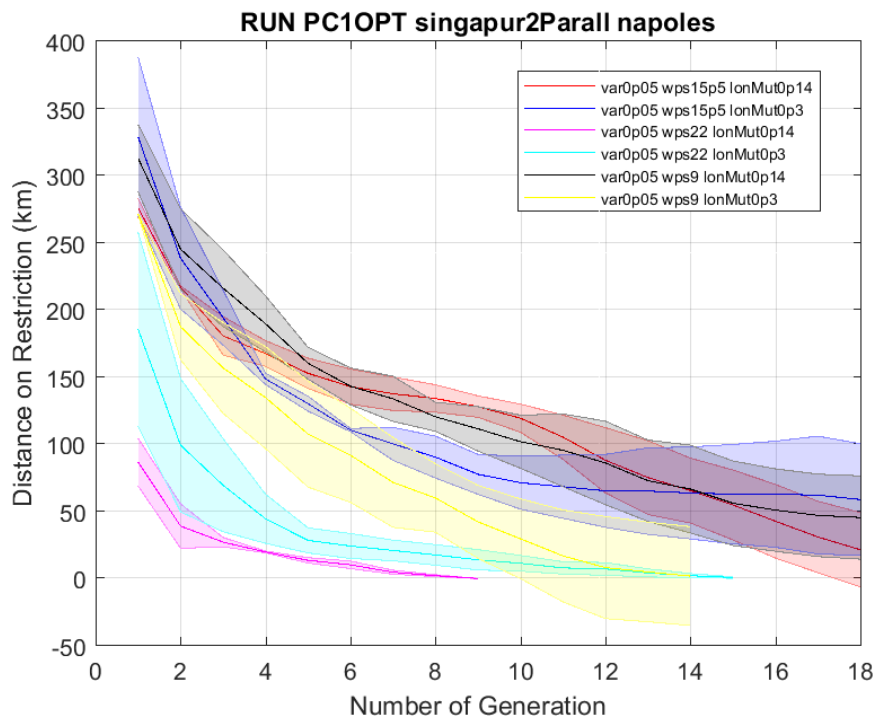


Figura 43 Media y varianza de la Penalización. Singapur-Nápoles, Vargen=0.05

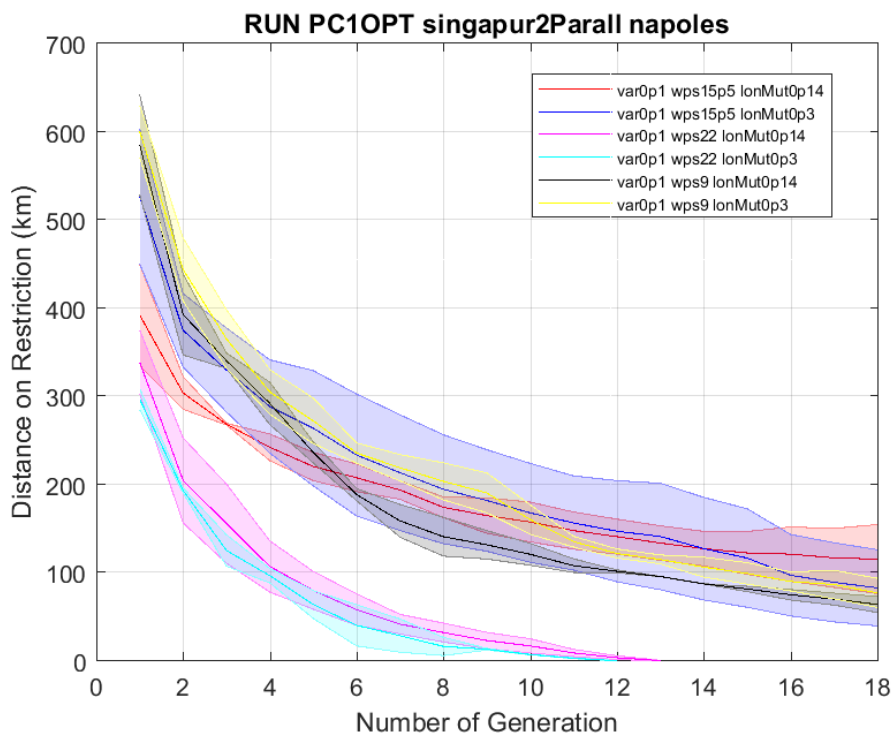
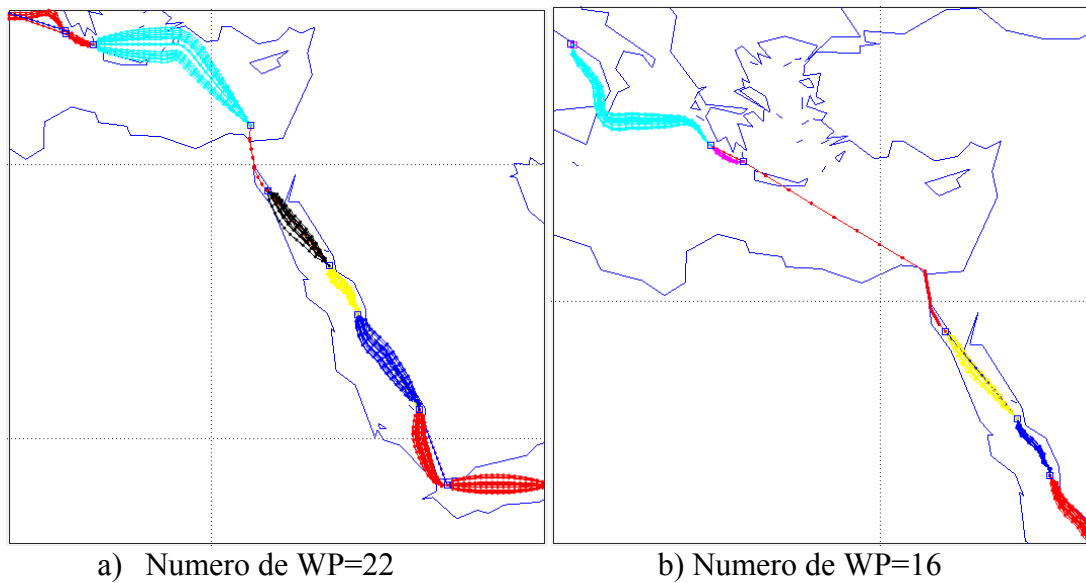


Figura 44 Media y varianza de la Penalización. Singapur-Nápoles, Vargen=0.1



**Figura 45** Resultados alrededor del Canal de Suez

### **Escenario Singapur - Reikiavik**

La interpretación de estas gráficas es la misma que para la anterior trayectoria, puesto que también atraviesa el Canal de Suez, y nuevamente se ven privilegiadas las propiedades de convergencia a la factibilidad en el caso de máximo número de WPs. En este caso no obstante, el comportamiento de las demás familias paramétricas con números intermedio y bajo de WPs no es tan malo como en la trayectoria con destino a Nápoles, pues el siguiente WP una vez atravesado el canal está al sur de Sicilia y el empalme con el mismo no obliga a cruzar ninguna isla, como sucedía con Creta en el caso del escenario con destino en Nápoles (ver Figura 48).

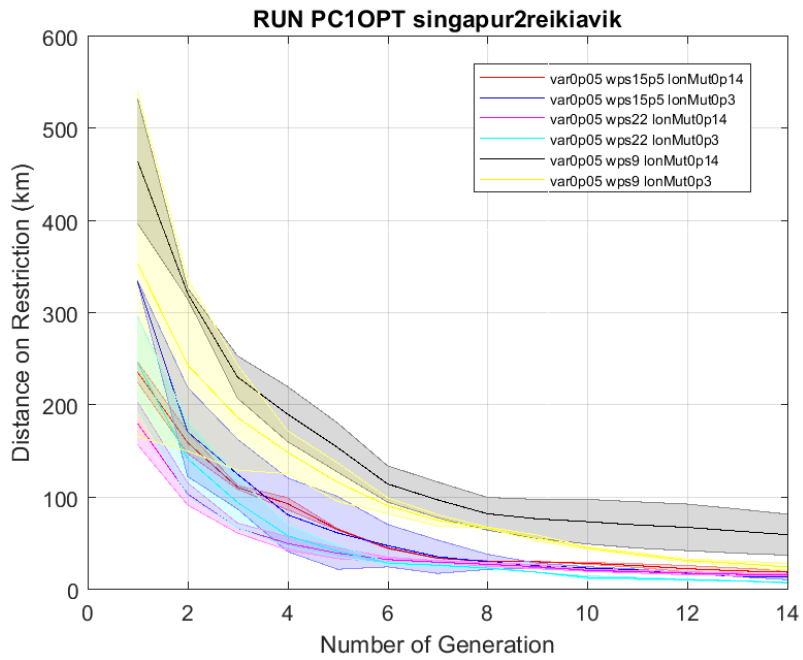


Figura 46 Media y varianza de la Penalización. Singapur-Reikiavik, Vargen=0.05

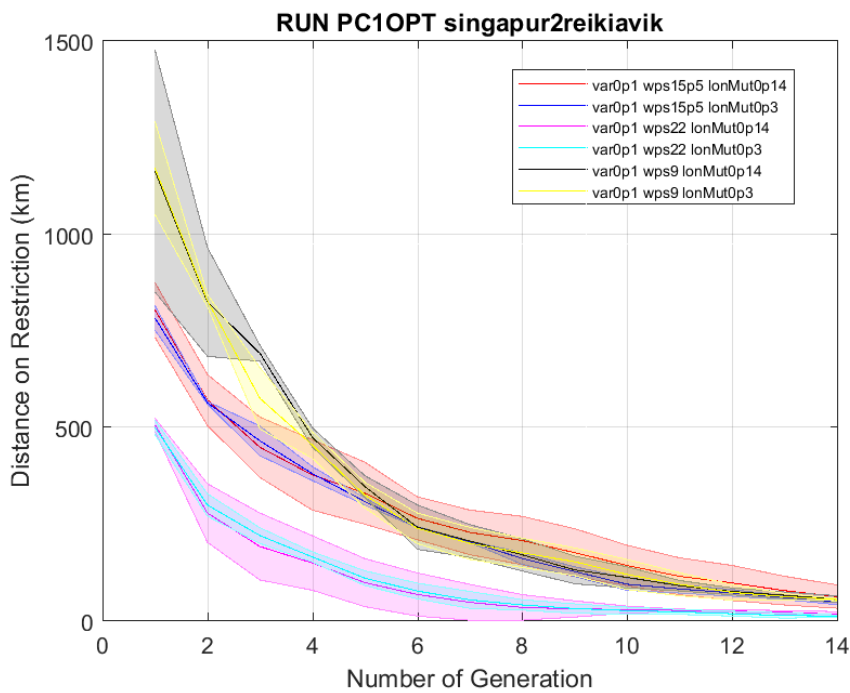


Figura 47 Media y varianza de la Penalización. Singapur-Reikiavik, Vargen=0.1

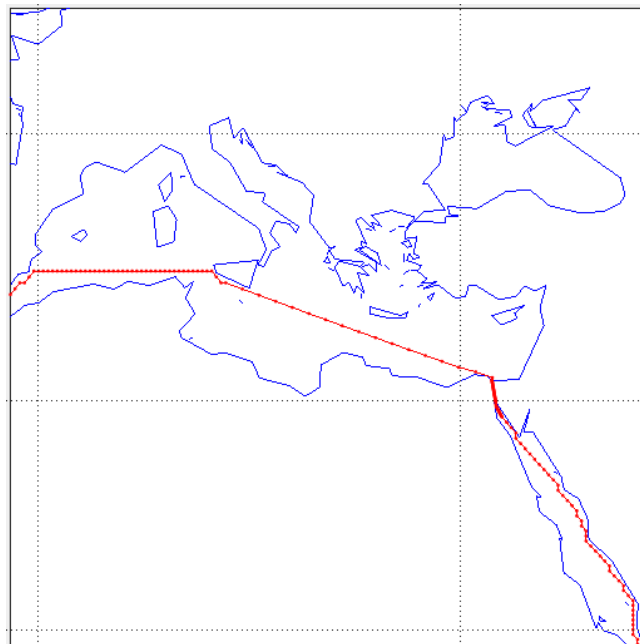


Figura 48 Escenario Singapur-Reikiavik con 16 WPs

### Escenario Tokio - Casablanca

La situación es aquí muy parecida a los dos escenarios recién presentados, con Singapur como puerto de origen. En efecto, aquí también se tiene una trayectoria que pasa por el Canal de Suez, por lo que por idénticos motivos, las características de convergencia son mejores con un número elevado de way-points, como se aprecia en las curvas cyan y magenta de las anteriores figuras. En esta ocasión no se consiguen medias que converjan a soluciones factibles, y de hecho el mejor individuo de todos tiene unos 4 km de recorrido por zona restringida, a todas luces por falta de iteraciones suficientes del GA. Además, este escenario tiene la peculiaridad de que a partir de la décima generación, los valores de desviación típica aumentan de forma considerable para las trayectorias con mínimo número de Way-points, lo cual no es más que un engaño visual, pues la realidad es que revisando las matrices donde se almacenan los históricos de coste de las poblaciones, se vio que por algún motivo desconocido en dicha generación el algoritmo se detuvo al cumplir el criterio de parada de haber pasado una generación sin mejora apreciable de la población (35€ de coste medio). Esto no tiene explicación aparente, pues en ese momento las soluciones estaban todavía lejos de ser factibles (unos 200 km de penalización), por lo que cualquier pequeño efecto de un operador como el de mutación introduce un gran incremento en la función de mérito.

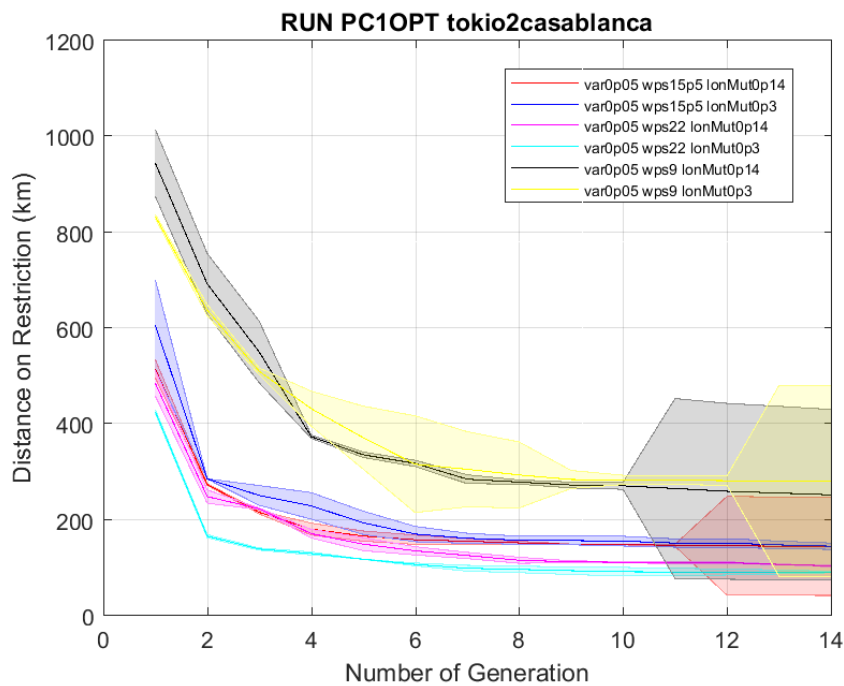


Figura 49 Media y varianza de la Penalización. Tokio-Casablanca, Vargen=0.05

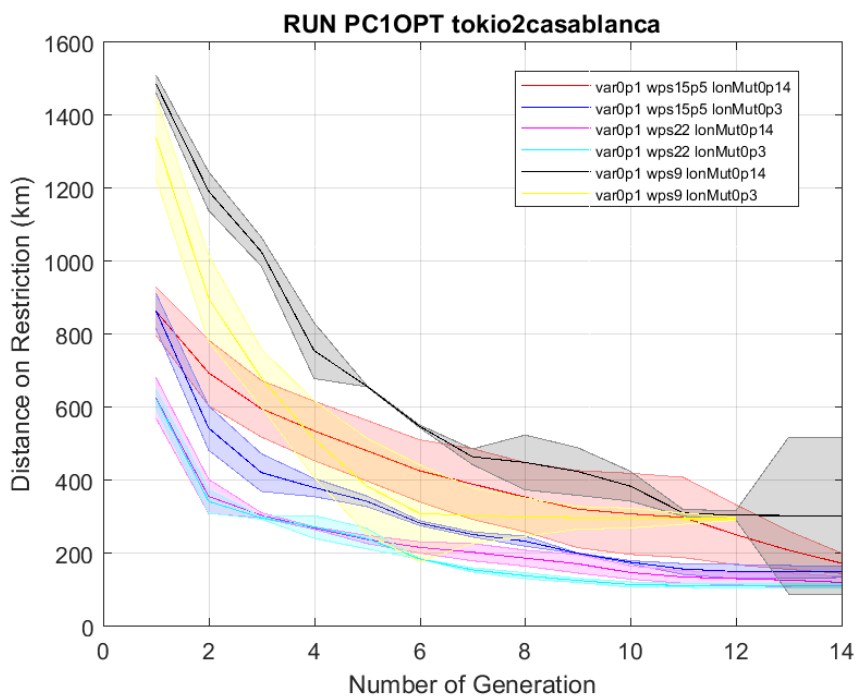


Figura 50 Media y varianza de la Penalización. Tokio-Casablanca, Vargen=0.1

### Escenario Vladivostok - Adén

En este escenario se obtiene una buena convergencia hacia el espacio de trayectorias factibles, para todas las combinaciones de parámetros, incluso con el bajo número de iteraciones utilizado (18).

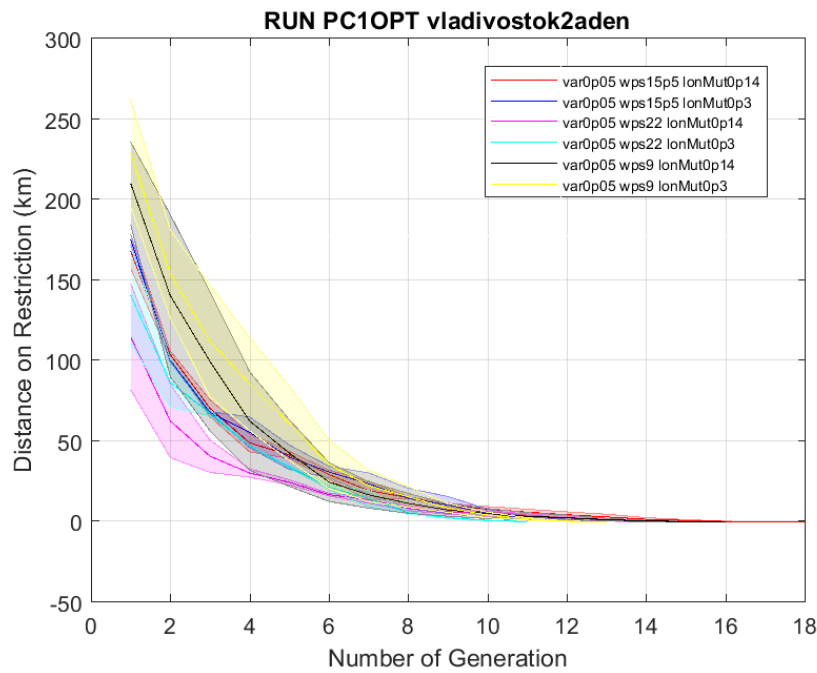


Figura 51 Media y varianza de la Penalización. Vladivostok-Adén, Vargen=0.05

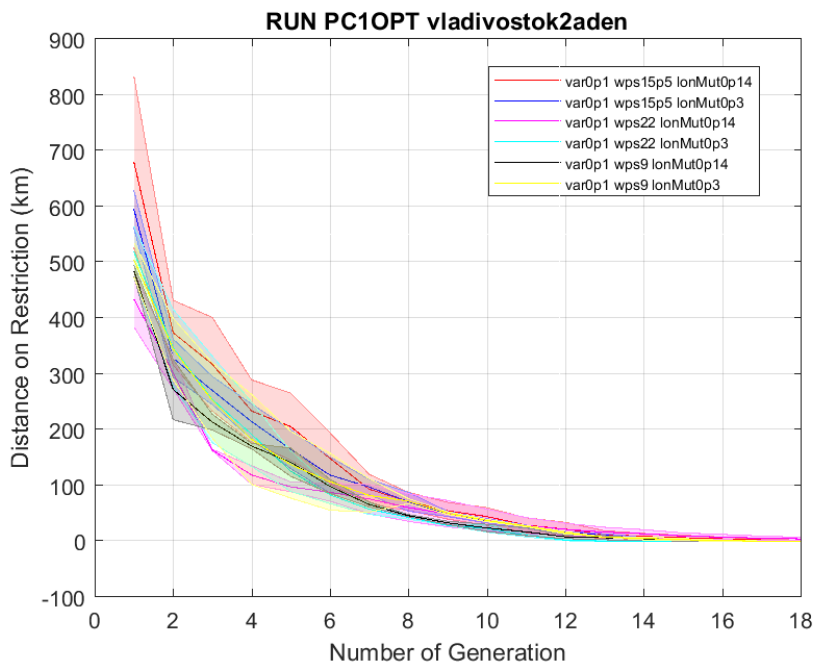


Figura 52 Media y varianza de la Penalización. Vladivostok-Adén, Vargen=0.1

### Escenario Vladivostok - Sebastopol

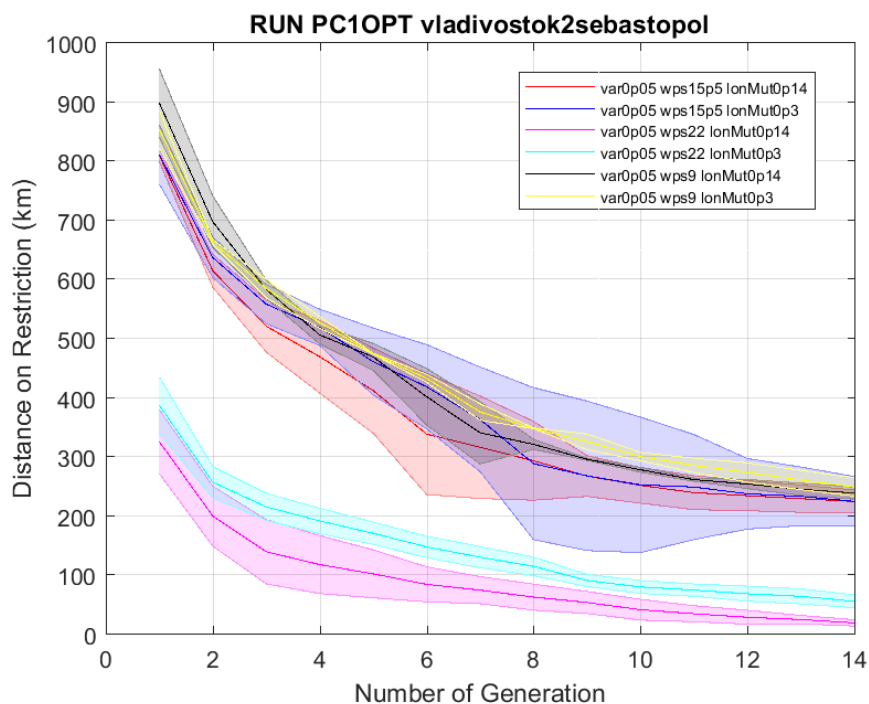


Figura 53 Media y varianza de la Penalización. Vladivostok-Aden, Vargen=0.05

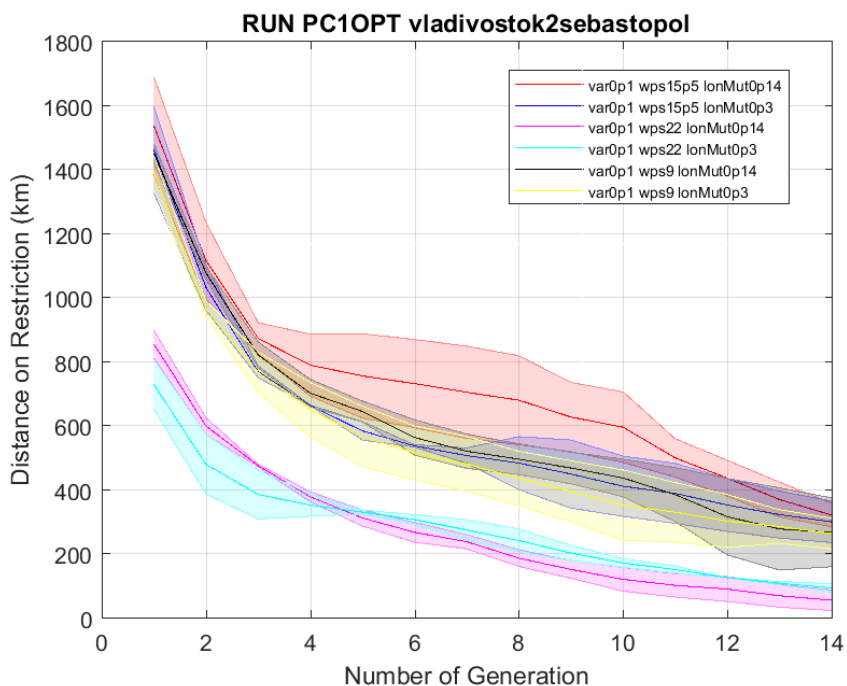


Figura 54 Media y varianza de la Penalización. Vladivostok-Aden, Vargen=0.1

Nuevamente tenemos un ejemplo de trayectoria que atraviesa el Canal de Suez, y que al ser muy larga tiene tendencia a situar WPs muy alejados de dicho canal cuando el número total máximo de WPs es moderado o bajo. El mecanismo ya ha sido previamente explicado, y está detrás del hecho, muy evidente aquí, de que la convergencia sea mucho más rápida, y desde valores iniciales mucho mejores, cuando

dicho número de WPs es el mayor de los considerados (22). Además de este comportamiento, ya visto, aquí se tiene la particularidad de que se obtienen mejores valores de la función de mérito con valores pequeños de la mutación.

### Escenario Estocolmo - Reikiavik

La principal particularidad de este escenario es que existe mucha menos diferencia entre las dos varianzas de generación: de hecho incluso se da la circunstancia de que la mejor media se da en el caso de la mayor varianza (0.1), en combinación con los mayores números de WP y valores de mutación. Incluso los valores iniciales parecen ser algo mejores en general con la varianza de generación superior, lo cual es en conjunto una clara excepción, pero muy probablemente se trate de una casualidad geométrica de la ruta generada por el A\* que se entiende bien en vista de la figura 57. En ella, la zona rodeada por un círculo a la derecha, A\* atraviesa por la mitad una estrecha y alargada isla, cuyos bordes son casi rodeados por los extremos de la generación con  $\sigma_{var}=0.1$ . En la otra zona rodeada por un círculo, con trayectorias en magenta en el extremo de la península de Jutlandia, también ayuda a bordear el obstáculo una  $\sigma_{var}$  grande

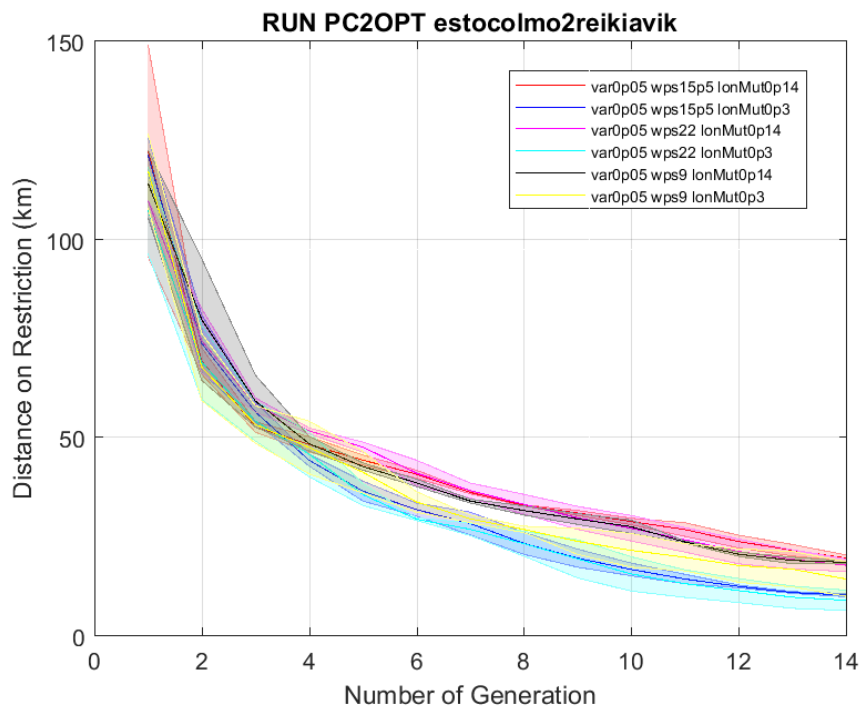


Figura 55 Media y varianza de la Penalización. Estocolmo-Reikiavik, Vargen=0.05

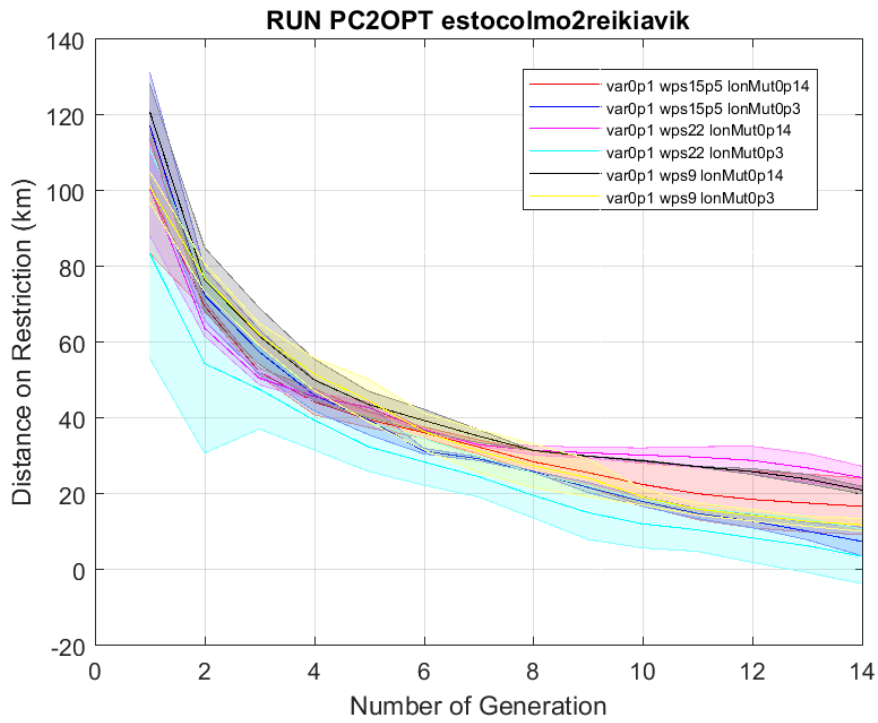


Figura 56 Media y varianza de la Penalización. Estocolmo-Reikiavik, Vargen=0.1

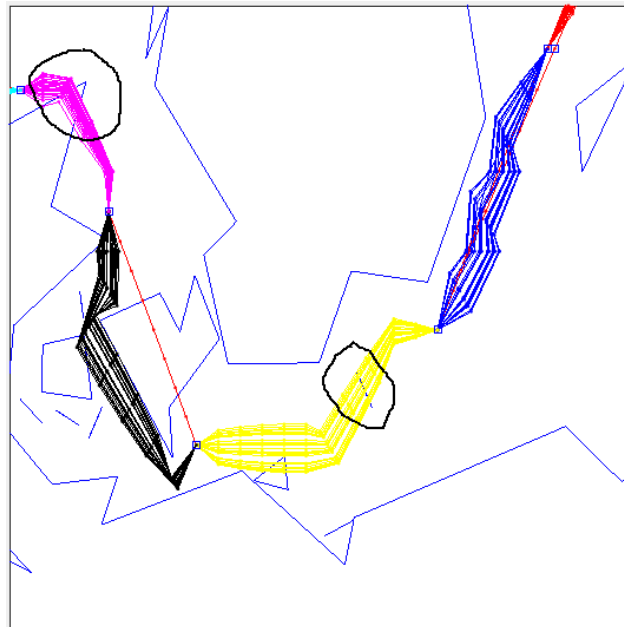


Figura 57 Detalle de la zona Báltica de la trayectoria Estocolmo-Reikiavik

### Escenario PtMoresby - Casablanca

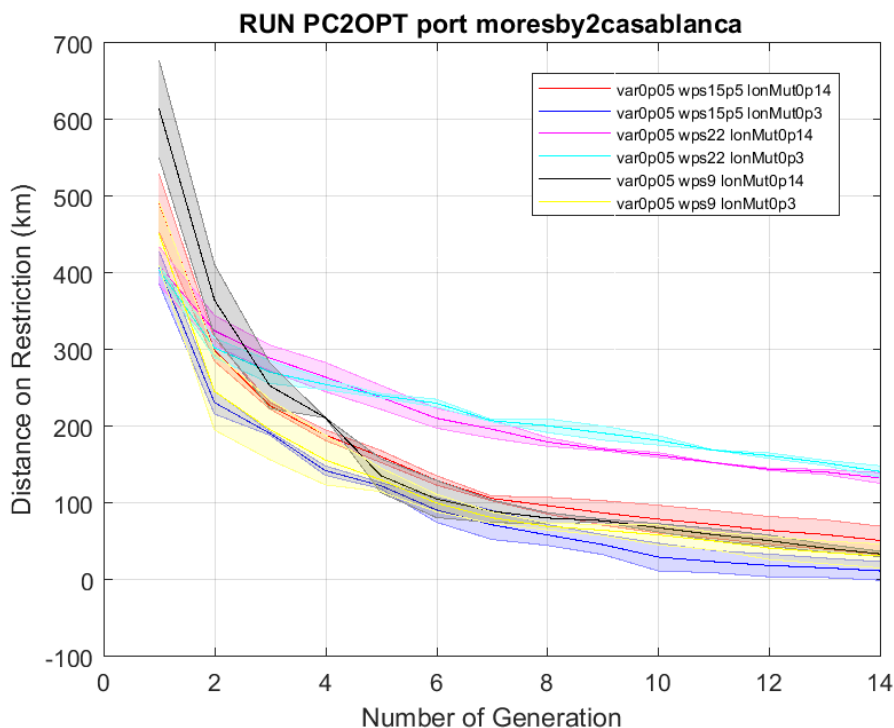


Figura 58 Media y varianza de la Penalización. PtMoresby-Casablanca, Vargen=0.05

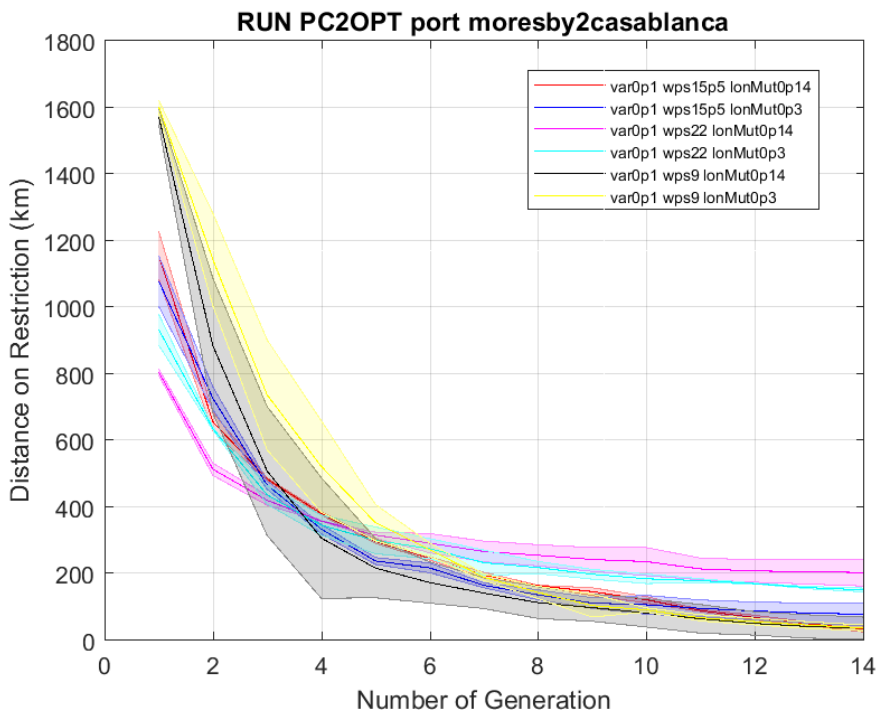
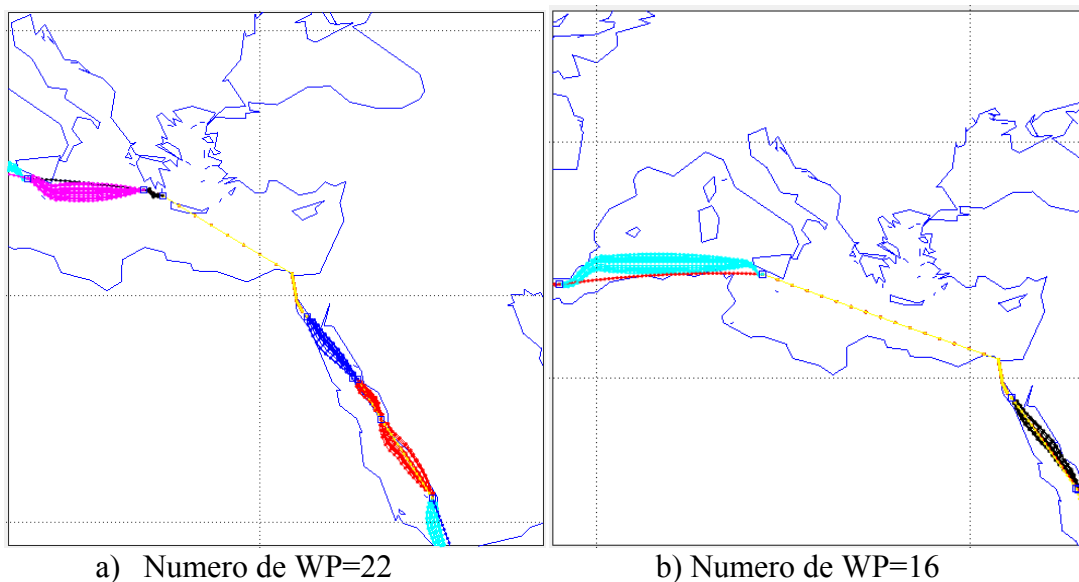


Figura 59 Media y varianza de la Penalización. PtMoresby-Casablanca, Vargen=0.05

Este es el último escenario cuya caracterización estadística se presenta, y es inmediato ver que presenta una peculiaridad respecto a los que ya se han analizado y tienen en común con esta ruta el atravesar el Canal de Suez. Habíamos visto que en este tipo de

trayectorias solía ser beneficioso, sobre todo si son muy largas como es el caso, el tener el mayor número de WPs (22 en este análisis), para así evitar que los WPs adyacentes al más cercano al canal de Suez estuvieran demasiado lejos del mismo.

Estas premisas se cumplen en este escenario, pero los resultados de convergencia muestran que el comportamiento es el contrario a lo que se podría esperar de lo visto hasta ahora. Sin embargo, tiene una explicación, y es que en este caso, por la forma de la trayectoria y su gran longitud, la familia paramétrica de  $N_{WP}=22$  tiene un WP adyacente al más cercano al Canal que está muy lejos de este, y se da la casualidad de que el enlace entre el tramo rígido de paso por el Canal y ese WP alejado vuelve a atravesar la isla de Creta, en una extensión considerable, lo cual dificulta que el mecanismo de mutación, que sí puede luchar contra este comportamiento indeseable del de generación, tenga éxito en el reducido número de iteraciones que estamos obligados a correr por motivos de eficiencia computacional. Esto se puede ver en la figura 60.



**Figura 60** Resultados alrededor del Canal de Suez para el escenario PtMoresby-Casablanca

Una vez analizados en detalle los gráficos de convergencia de todos los escenarios, la conclusión global obvia es en primer lugar que la varianza de generación más grande usada, 0.1, no es un buen valor porque introduce mucho error inicial en la generación (las soluciones de  $A^*$  suelen tener tramos muy largos de cabotaje, en los que se navega en paralelo a la costa muy cerca de ella), y a los mecanismos del GA les cuesta más compensar ese error inicial.

Al mismo tiempo, aunque dicha varianza sea grande, no es lo suficiente como para permitir explorar otras zonas del espacio de búsqueda donde pudiese haber otro óptimo local mejor que el cercano a la solución del  $A^*$  (esta no suele ser directamente óptima, pues al tener el grid una pobre resolución, normalmente existen pasos por zona de restricción, por ejemplo en los Canales).

Otra tendencia general que se infiere de este estudio es que cuanto más compleja es la trayectoria a optimizar, y sobre todo si ésta atraviesa alguno de los dos canales presentes, mejor se comportará el algoritmo cuantos más WPs se escojan, lo cual parece relativamente intuitivo.

## Capítulo 5. Conclusiones

A continuación se resumen las principales conclusiones extraídas a lo largo de este Trabajo Fin de Master y se presentan algunas líneas de desarrollos futuros que deberán llevarse a cabo, principalmente, para disponer de una herramienta computacionalmente más eficiente que la actual.

### 5.1 Conclusiones

En el presente TFM se ha desarrollado un planificador de trayectorias de buques comerciales en el entorno Matlab, habiéndose llegado con éxito a tener un software funcional, robusto y totalmente automático. Esto constituye un avance fundamental respecto a la solución original del programa, desarrollada para la asignatura de Optimización Heurística de este Master, donde para poder obtener trayectorias aproximadamente factibles, era necesaria la intervención directa del usuario, a través de colocación manual de way-points.

Por lo tanto, en el estado actual de desarrollo, dada una pareja de puertos origen-destino que definen el escenario, una fecha de partida que determina las condiciones de oleaje y hielo, y un valor para los tres parámetros<sup>21</sup> que controlan el comportamiento del algoritmo genético contenido en la aplicación, el programa es capaz de calcular una trayectoria óptima respecto de una función de mérito mono-objetivo. Esta función incluye el coste de combustible asociado a recorrer la distancia total de la trayectoria, una penalización muy importante para huir rápidamente de las zonas de restricción (hielo y continentes), y los costes operativos proporcionales al tiempo de travesía, para cuya minimización interesa que el buque pueda navegar por zonas en las que su velocidad sea mayor.

Globalmente, la herramienta funciona razonablemente bien, y de hecho en la Tabla 3 se puede ver que en el 70% de los 17 escenarios visitados en la fase de validación se consigue converger a soluciones factibles, aunque en ninguno de dichos escenarios se cumplía la condición de que la solución inicial con la que comienza a trabajar el GA, calculada por el Algoritmo A\* fuese directamente realizable. Esto es así porque la resolución geográfica del modelo empleado en A\* es mucho menor que en el GA, por lo que los pasos cercanos a costas, aunque formalmente sean realizables para el algoritmo

---

<sup>21</sup> Se trata de la varianza de generación, el número máximo de WPs que asigna automáticamente, en base a la distancia a las restricciones, la propia función de generación, y por último la amplitud de las mutaciones

A\* (que solo devuelve soluciones que evitan los obstáculos) pueden fácilmente no serlo cuando dicha trayectoria se pasa al modelo más preciso empleado en el GA. Esto sucede claramente, por ejemplo, en los pasos por el Canal de Suez o el de Panamá. Por lo tanto, en conjunto se puede decir que el algoritmo genético empleado es capaz de perfeccionar las trayectorias calculadas por el método determinista inicial, pero tiene una capacidad bastante limitada para explorar zonas del espacio alejadas de la solución dada por A\*.

En relación con el 30% restante de trayectorias que no han podido converger en la fase de validación a zonas sin penalización, se puede decir con carácter general que el motivo de esto no es que el programa no sea capaz de encontrar dichas soluciones, sino que no se le han dejado las suficientes iteraciones para ello. Como se ha comentado, el motivo de haber limitado las iteraciones a 18 en la mayoría de escenarios es que, al ser la función de coste estructuralmente compleja, los tiempos de computación en su llamada son largos, y por la naturaleza del GA, es necesario llamarla muchas veces. A modo de ejemplo, los tiempos de ejecución, para una trayectoria larga y compleja por tener un número elevado de cortes con los contornos de restricciones<sup>22</sup>, de un ciclo completo del GA con 18 iteraciones, pueden llegar a ser de más de una hora.

En el caso de la trayectoria Nueva York - Tokio, que es la que en primera instancia más lejos se quedó de converger, se han presentado en el Capítulo 4 resultados adicionales aumentando las iteraciones hasta 50, donde se aprecia que la distancia que la trayectoria recorre sobre la zona de penalización (hielo o tierra firme) ya se ha conseguido reducir casi al completo, hasta sólo 4 km. En última instancia, se ha llegado, con 70 iteraciones, a obtener una trayectoria factible, aunque sin tener tiempo para realizar la evaluación sistemática correspondiente.

Desde el punto de vista de esta misma evaluación sistemática, los resultados del estudio paramétrico arrojan conclusiones interesantes que se han detallado también en el Capítulo 4, y que se pueden resumir en que son positivas las varianzas pequeñas (similares o inferiores a la menor usada en el estudio) y que el número de WPs es un parámetro muy sensible al rendimiento del GA, siendo la regla que mejor resume su elección el que este tienda a ser un número grande, del orden de 20, sólo si la trayectoria es larga y atraviesa zonas complejas con restricciones (y muy especialmente cuando se atraviesa uno de los dos canales modelados).

---

<sup>22</sup> Los cortes con las restricciones ralentizan el cómputo no solo de la función de mérito, que tiene que evaluar distancias para el término de penalización, sino también para los mecanismos evolutivos del GA, como el de mutación modificada, donde la probabilidad de mutar zonas cercanas a los cortes es 1. Además, la función de mérito se vuelve muy lenta cuando la trayectoria atraviesa zonas árticas, privilegiadas en el estudio por su especial interés comercial

## 5.2 Trabajos Futuros

La principal acción de mejora del algoritmo tiene que venir necesariamente de un trabajo de aumento de la eficiencia computacional. Aunque se han seguido los consejos de la asignatura de Optimización Heurística, (almacenando las evoluciones de la función de mérito en una matriz que se va pasando como argumento de entrada a los sucesivos operadores del GA para ahorrar llamadas innecesarias y muchas costosas a dicha función), siguen siendo necesarias muchas llamadas a la misma en cada paso de iteración del algoritmo.

Por tanto, parece obvio que el primer lugar dónde se debe centrar el esfuerzo es en optimizar el código de la función de mérito, que es especialmente simplificable, sin perder posiblemente demasiada precisión, en la gestión de asignación de velocidades y consumos específicos de la zona ártica (en función de la cercanía a los contornos, aunque en el cálculo de cuyas distancias ya se han incluido discretizaciones importantes para acelerar el cálculo). Concretamente, dicha evaluación se hace sólo cada 10 puntos de la trayectoria, con un método impreciso que consiste en lanzar curvas de azimut constante hasta cortar el contorno, que aún siendo una simplificación, consume mucho tiempo de cálculo. Otra fuente fundamental de consumo de tiempo (llegando a ser la mitad del tiempo de cómputo del proceso de evaluación) es el cálculo de los puntos de corte con el contorno.

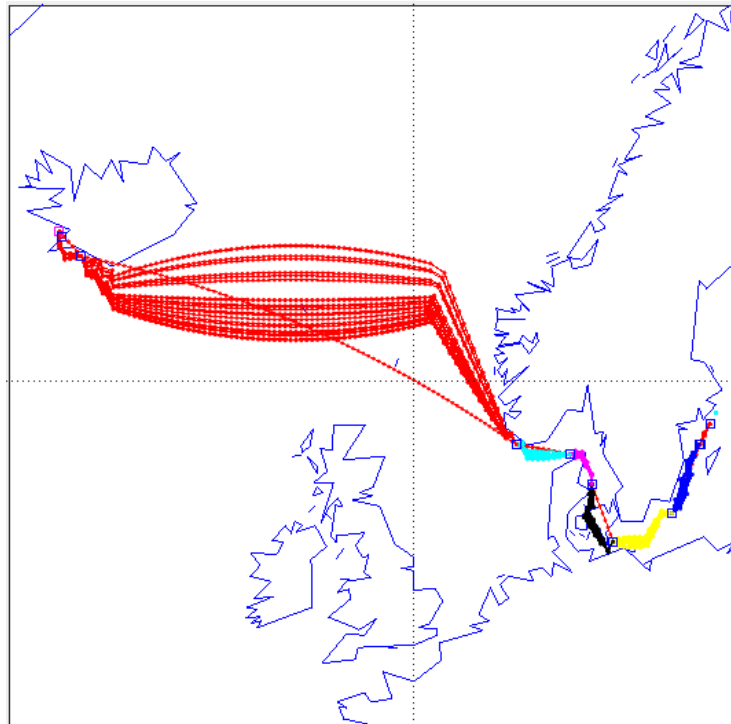
Ya se han evaluado alternativas para intentar reducir este último consumo, como sustituir el comando de matlab `intersections` por el equivalente `polyxpoly`, pero el resultado ha sido incluso contrario al esperado.

Otro operador en el que se gasta mucho tiempo, entre otras cosas por lo complejo del código y la necesidad que implica ir evaluando todos los individuos de la población en cada tramo entre WPs por separado, es la función de generación. Una ejecución media a esta función puede tardar del orden de 2 minutos, aunque sólo se la llama una vez en cada ciclo de iteraciones de una llamada al GA básico.

En relación con mejoras que tienen que ver con los algoritmos empleados, independientes de la función de mérito usada, es importante poder evaluar estrategias distintas de penalización, o bien directamente reducir el valor de penalización por km usado, que quizá haya sido demasiado elevado (1 millón de € por km). Una alternativa que estuvo en mente del alumno (pero que no fue finalmente implementada por falta de tiempo) es la de emplear un método de la burbuja o alguna estrategia en la que la penalización varíe con las iteraciones, de forma por ejemplo que la penalización sea menor en los primeros instantes para poder atravesar zonas no factibles inicialmente y explorar zonas nuevas del espacio posteriormente.

Un ejemplo de esto se puede ver en la siguiente figura, extraída de la función de generación en el escenario Estocolmo-Reikiavik, donde se ve, en el último tramo entre WPs en rojo antes de llegar a las costas de Islandia, un candidato aislado a ortodrómica (curva de mínima distancia), que mejoraría bastante en coste por distancia a las alternativas cercanas a él, gaussianas alrededor de la solución que da A\*. Sin embargo, esa alternativa acaba siendo descartada por el GA, dado que existe un pequeño corte de

la ortodrómica con la costa sur de Islandia, cuya penalización compensa a lo que se gana en distancia. Esta tendencia ha resultado ser generalizada para la mayoría de escenarios, donde el exceso de penalización ha llevado a descartar rápidamente alternativas de exploración de otras zonas del espacio, lo cual convierte al GA más en una herramienta de ajuste y perfeccionamiento del A\*, que en algo complementario a este y que realmente aporte una importante capacidad de exploración de un espacio, como el que nos ocupa en este TFM, extenso y complejo.



**Figura 61** Ejemplo de ortodrómica entre el sur de Noruega y el sur de Islandia que, siendo una importante ventaja en distancia, acaba siendo descartada

Una medida complementaria a esta última, y con el mismo afán, sería reforzar la lógica de lanzar aleatoriamente ortodrómicas entre WPs en el paso de generación, ya que es posible que se le haya otorgado una probabilidad de ocurrencia excesivamente baja, o demasiada penalización si atraviesa contornos, no ya como resultado de la propia evolución (paso de recombinación), sino en el propio funcionamiento del mecanismo de generación.

Por último, podría incluirse, en esta misma función de generación, una nueva idea surgida de la observación de que las trayectorias generadas por este programa tienden a tener una gran rigidez articulada alrededor de los WPs. En efecto, abusar de WPs puede ser bueno, como ya se ha visto, desde un punto de vista de aportar precisión a los pasos por los canales y sus alrededores, pero ancla en exceso las trayectorias a la zona ya explorada, por lo que una idea a estudiar sería la posibilidad de añadir algo similar a una mutación aleatoria, con poca probabilidad, de algún way-point, de tal forma que los dos tramos adyacentes al mismo se desplazasen considerablemente para explorar nuevas zonas. En este mecanismo, habría que asegurar que la nueva posición del WP "mutado"

no acabase en el interior de un contorno prohibido, cosa bastante probable debido a la tendencia de estos mimos WPs a encontrarse en la cercanía de las restricciones.

## Referencias

- [1]: Walther, Rizvanolli, Wendebourg y Jahn . “**Modeling and Optimization Algorithms in Ship Weather Routing**”. Fraunhofer Center for Maritime Logistics and Services. Hamburgo, 2016.
- [2]: Path Planning: A\* algorithm (adjunto al mail como PDF)
- [3]: Masudur Rahman, Iftekharul y Hassan Nijami. “**Comparative Study of Different Path planning Algorithms: a Water Based Rescue System**” International Journal of Computer Applications. Volume 39– No.5, February 2012
- [4]: Rafal Szlapczynski . “**Evolutionary approach to ship's trajectory planning within Traffic Separation Schemes**”. POLISH MARITIME RESEARCH 1(72) 2012 Vol 19
- [5] “*Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por barco*” – Monografía del Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación de la Universidad de Oviedo. 2008
- [6]: '**Trajectory Planning with Negotiation for Maritime Collision Avoidance**'. Hornauer, Hahn (University of Oldenburg), Blaich, Reuter (University of Applied Sciences Konstanz). 2015
- [7]: '**Stochastic Ranking for Constrained Evolutionary Optimization**', 2000. Runarsson (University of Iceland), Yao (University of Birmingham)
- [8]: '3D-Path planning for th Navigation of Unmaned aerial Vehicles by Using Evolutionary Algorithms', 2008. Hasircioglu, Topcuoglu (Marmara University, Turkey).
- [9] Asociación de Navieros Españoles <https://anave.es/prensa/ultimas-noticias/1757-un-estudio-confirma-que-el-sector-maritimo-mantiene-sus-emisiones-de-co2-bajo-control-ante-la-proxima-reunion-del-grupo-de-trabajo-de-la-omi>
- [10] <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>
- [11] <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/implementations.php>
- [12] [ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi\\_1/00README](ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/multi_1/00README)
- [13]: '**On the performance comparison of multi-objective evolutionary UAV path planners**', 2013. Besada-Portas (Universidad Complutense de Madrid), De la Torre (UNED)
- [14] [https://es.wikipedia.org/wiki/Estrecho\\_de\\_Malaca](https://es.wikipedia.org/wiki/Estrecho_de_Malaca)
- [15] 'Arctic Shipping – Commercial Opportunities and Challenges', Hansen, Grónsedt, Lindstróm, Graversen, Hendriksen. Copenhagen Business School Maritime. 2016
- [16] [https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Puertos\\_por\\_tr%C3%A1fico\\_de\\_contenedores](https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Puertos_por_tr%C3%A1fico_de_contenedores)
- [17]: <http://www.soest.hawaii.edu/wessel/gshhg/>
- [18]: [https://nsidc.org/data/g02186?qt-data\\_set\\_tabs=2#qt-data\\_set\\_tabs](https://nsidc.org/data/g02186?qt-data_set_tabs=2#qt-data_set_tabs)

[19] Map Projections - A Working Manual. *US Geological Survey Professional Paper*. John P. Snyder. 1987

[20]: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_wave](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_wave).

[21]: <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26248-a-a-star-search-for-path-planning-tutorial>

[22]: Path Planning: A\* algorithm (adjunto como PDF)

## Lista de Siglas

|                    |   |
|--------------------|---|
| NWP/PNW:           | Northwest Passage   |
| WP:                | Way-Point   |
| GSHHS:<br>Database | Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography |
| NOAA:              | National Oceanic and Atmospheric Administration                 |
| MASIE:             | Multisensor Analyzed Sea Ice Extent                             |