

Simulación dinámica precisa y optimización de trayectoria de globos estratosféricos

Mario Alberto Mendoza-Bárceñas

Centro de Desarrollo Aeroespacial, Instituto Politécnico Nacional
Belisario Domínguez 22, Centro Histórico, Ciudad de México, México
mmendozab@ipn.mx

Rafael Prieto Meléndez

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM
Circuito exterior s/n, Ciudad Universitaria, México
rafael.prieto@ccadet.unam.mx

Lauro Santiago Cruz

Instituto de Ingeniería, UNAM
Circuito exterior s/n, Ciudad Universitaria, México
lsc@pumas.iingen.unam.mx

Guillermo Manuel Asensio López, Manuel Sanjurjo-Rivo

Universidad Carlos III de Madrid
Avenida de la Unviersidad 30, Leganés, España
manuel.sanjurjo@uc3m.es

RESUMEN

El uso de globos estratosféricos como herramientas de validación tecnológica en el desarrollo de pruebas experimentales para el diseño de misiones espaciales, ha ido en aumento en los últimos años. No sólo por el menor costo que representan respecto a una misión espacial, sino también por las ventajas en cuanto al aprendizaje y corrección de errores que permiten tras su recuperación. Adicionalmente, su operación se da en condiciones ambientales relativamente cercanas a las presentes en órbita, convirtiéndolos en candidatos perfectos para una amplia variedad de misiones no tripuladas.

En este artículo se presenta el desarrollo de un simulador numérico para globos estratosféricos que integra las ecuaciones matemáticas que describen su dinámica, utilizando esquemas de predicción meteorológica de viento de alta fidelidad. Estas predicciones meteorológicas están dadas en términos probabilísticos, lo que introduce incertidumbre en la propagación de la evolución del sistema. El simulador permite, por lo tanto, calcular tanto la evolución de la sonda estratosférica más probable, así como la dispersión de dicha trayectoria nominal.

El simulador se valida comparando los resultados obtenidos con respecto a los datos de vuelo provistos por el Grupo de Instrumentación Aeroespacial (CDA-IPN-CCADET-IINGEN-UNAM) y que fueron adquiridos por el instrumento SADM-1, en la pasada misión a bordo de la plataforma suborbital CSM en noviembre de 2016.

También se presenta una metodología de optimización que permite reducir el alcance del globo estratosférico y su dispersión en vuelos sin control. Del mismo modo, en vuelos donde el sistema de control esté incorporado, permite aumentar su autonomía. En este artículo presentamos resultados preliminares obtenidos por el simulador y el optimizador en los casos de validación y estudio propuestos.

PALABRAS CLAVE: globos estratosféricos, simulación, instrumentación, optimización

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años el incremento de aplicaciones utilizando globos de gran altura (HAB, *High Altitude Balloons*, por sus siglas en inglés) se ha convertido en un importante nicho de oportunidad para el desarrollo de sistemas de simulación dinámica, por medio de los cuales es posible predecir y analizar sus trayectorias durante los vuelos.

Los HAB científicos son las plataformas perfectas para el desarrollo de experimentos, tanto de registros atmosféricos como para la validación de sistemas y componentes en ambiente de espacio cercano, debido a su estabilidad intrínseca así como a sus capacidades de flotabilidad. No obstante, para poder realizar un análisis efectivo, es necesario poder estimar sus trayectorias para poder identificar las condiciones a las cuales estará sujeto el HAB en cada una de sus etapas del vuelo.

El análisis de los datos respecto a la trayectoria estimada de los HAB, puede conllevar ahorros económicos, así como la implementación de estrategias de optimización, en cuanto a consideraciones sobre dispersiones geográficas respecto de la ubicación del sitio de lanzamiento, con el objetivo de facilitar su recuperación. Adicionalmente, permite la evaluación del sitio de lanzamiento óptimo para alcanzar altitudes específicas, así como una rápida localización con el menor consumo de potencia.

Aunque los HAB son en su mayoría utilizados para experimentación científica, adicionalmente tienen un impacto importante en los análisis meteorológicos, permitiendo a empresas y organismos gubernamentales contar con la información necesaria para poder realizar pronósticos climatológicos más acertados, los cuales resultan de gran utilidad en diversas áreas económicas y estratégicas, como el caso de los sistemas de control aéreo.

En este artículo se describe de manera general, el contenido conceptual bajo el que está diseñado el Simulador de Trayectoria y Optimización para HAB, desarrollado en la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M), el cual, en su primera versión, fue validado utilizando los datos recabados por el sistema SADM-1, a bordo de la misión suborbital CSM de noviembre de 2016, lanzada desde León, Guanajuato. Así mismo, se muestran los primeros resultados de su procesamiento mediante el simulador, los cuales son comparados con los datos de trayectoria obtenidos mediante la instrumentación para rastreo y seguimiento que llevó a bordo la plataforma CSM.

2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SIMULADOR

En este apartado se presenta el modelo implementado para la simulación de la trayectoria del globo estratosférico.

El código que define la trayectoria del globo, ha sido programado en su totalidad usando Matlab. Dicho código acepta como entrada las coordenadas iniciales, así como las condiciones iniciales del globo y da como salida la trayectoria completa del mismo. Una descripción del simulador, se muestra en la figura 1, en la cual es posible identificar los principales módulos a partir de los cuales está integrado.

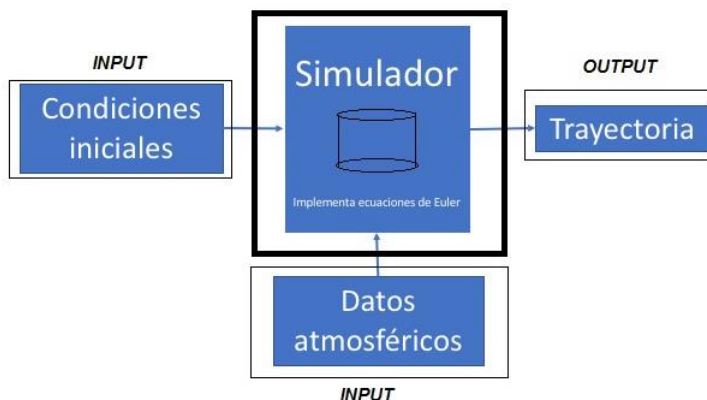


Figura 1. Esquema general del simulador de trayectoria.

Para calcular las fuerzas aerodinámicas del globo se utilizaron los datos de viento proporcionados por la *National Oceanic Aviation Administration* (NOAA, por sus siglas en inglés) que provee datos precisos de la velocidad y la temperatura a lo largo de la trayectoria del globo [1]. NOAA proporciona una predicción nominal, junto con datos adicionales que permiten caracterizar la incertidumbre de dicha predicción. La forma de proporcionar esa información adicional es la de incluir un número elevado de diferentes predicciones con una probabilidad asociada. Todas las predicciones se tendrán en cuenta a la hora de estudiar la evolución del sistema y caracterizar la incertidumbre de la trayectoria. Para el proceso de optimización, se utilizará la herramienta de optimización de Matlab que permitirá reducir una variedad de parámetros relacionados con el vuelo según nuestro interés, por ejemplo, el sistema puede ser optimizado para encontrar la posición de lanzamiento que reduzca la dispersión del globo con respecto a su punto de origen. Los resultados de la optimización están explicados en el apartado 3.5.

2.1 Ecuaciones dinámicas

Teniendo en cuenta el sistema de coordenadas mostrado en la Figura 2., que representa un sistema de referencia cuyo eje Z apunta hacia arriba perpendicularmente a la Tierra, el X apunta al norte geográfico y el Y completa el sistema de coordenadas siguiendo la nemotécnica de la mano derecha. [2][3]

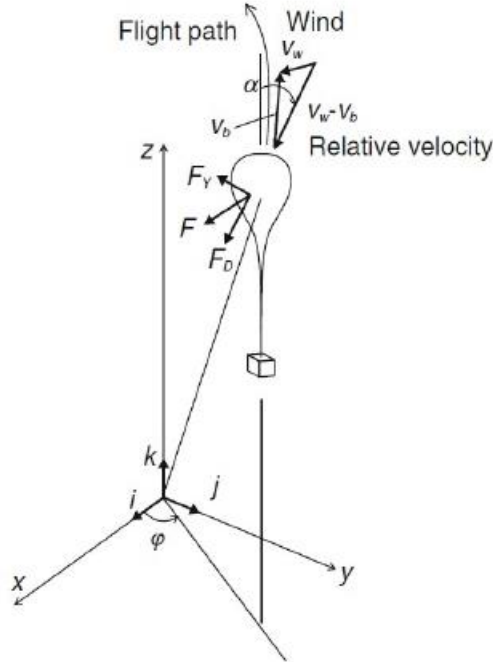


Figura 2. Sistema de coordenadas [2]

Desde este sistema de referencia, la posición del globo puede ser definida en su totalidad, pero para poder trabajar con las fuerzas aerodinámicas se incluye un nuevo sistema coordenado, con origen en el centro de masas del globo cuyas componentes serán establecidas por el ángulo de ataque del globo con respecto al viento. Los ángulos que relacionan ambos sistemas serán α , que es el ángulo entre la velocidad relativa y el eje vertical Z. Por otro lado, el ángulo ϕ que es el ángulo entre el eje X y la proyección de la velocidad relativa sobre el plano XY.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_a |v_w - v_b|^2 C_D A_b \quad (1)$$

$$F_Y = \frac{1}{2} \rho_a |v_w - v_b|^2 C_Y A_b \quad (2)$$

Donde v_w es la velocidad del viento, v_b es la velocidad del globo, A_b el área de la máxima sección del globo perpendicular a su eje, C_D y C_Y los coeficientes de resistencia aerodinámica y fuerza lateral, respectivamente, y $\rho_a = p_a m_m / T_a R_u$, siendo. p_a y T_a la presión y temperatura ambientales, m_m la masa molecular del aire (supuesto constante e igual a 28.97 g/mol) y R_u la constante universal de masa de valor 8.314 J/(mol K). Las fuerzas que afectan al sistema se componen básicamente de peso, empuje y fuerza de arrastre. Habitualmente, como en la Figura 2., estas fuerzas se descomponen en resistencia aerodinámica, F_D , y fuerza lateral, F_Y . En nuestro caso la fuerza lateral es despreciable, al tratarse de un globo esférico. Estas dos fuerzas definen la dinámica del sistema en su totalidad estableciendo la aceleración en cada una de las componentes del sistema de coordenadas originalmente propuesto con origen en la tierra en el punto de partida del globo, como se muestra en las siguientes ecuaciones (en las que ya se ha supuesto $F_Y = 0$).

$$F_x = F_D \sin \alpha \cos \varphi \quad (3)$$

$$F_y = F_D \sin \alpha \sin \varphi \quad (4)$$

$$F_z = -F_D \cos \alpha \quad (5)$$

Es importante, dentro del análisis del peso del globo, la mención de una contribución nueva en el balance de fuerzas llamada masa virtual, esta masa virtual tiene en cuenta la inercia del sistema desplazándose en un fluido y será dependiente de la dirección y valor de la aceleración, en nuestro caso y analizando la forma genérica del globo se puede asumir que el coeficiente es 0.5.

$$m_{virtual} = C_m \rho_a V_b \quad (6)$$

$$m_v = m_t + m_{virtual} \quad (7)$$

$$F_b = \rho_a V_b g \quad (8)$$

$$\Sigma F_i = m a_i \quad (9)$$

El simulador supondrá el gas dentro del globo como ideal, así pues, la dinámica del gas, así como la expansión del globo será regida por las leyes de los gases ideales. La temperatura interior del globo será considerada igual a la exterior y variará por tanto con la altura. Cabe destacar que dentro las posibles futuras mejoras del simulador, incluirían un modelo térmico y del material, lo que provocaría una variación en la expansión del globo, así como de la fuerza de flotación.

$$m_v \frac{d^2 x_b}{dt^2} = F_x \quad (10)$$

$$m_v \frac{d^2 y_b}{dt^2} = F_y \quad (11)$$

$$m_v \frac{d^2 z_b}{dt^2} = (\rho_a V_b - m_t)g + F_z \quad (12)$$

$$V_b = \frac{m_g R_u T_g}{m_{m_g} P_g} \quad (13)$$

Por último, cabe destacar las características de los tipos de archivo provistos por el NOAA, dichos archivos se encuentran en formato GRIB y proveen los datos de presión, temperatura y velocidad en una malla alrededor del globo terráqueo a diferentes alturas. Con dichos datos la trayectoria del globo puede ser estimada.

3 RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en el caso de validación, así como los de la optimización.

Como se ha indicado en el resumen inicial, la validación la realizamos utilizando los datos obtenidos en el ensayo de vuelo realizados por el Grupo de Instrumentación Aeroespacial (CDA-IPN-CCADET-IINGEN-UNAM) y que fueron adquiridos por el instrumento SADM-1, en la pasada misión a bordo de la plataforma suborbital CSM en noviembre de 2016.

3.1 Evolución de la altura

En la Figura , se muestra la evolución temporal de la altitud. La altitud en nuestro simulador experimenta un crecimiento casi exponencial debido a la suposición de que la temperatura interior del globo es la misma que la exterior por lo tanto la expansión del globo es constante siguiendo las leyes de los gases ideales.

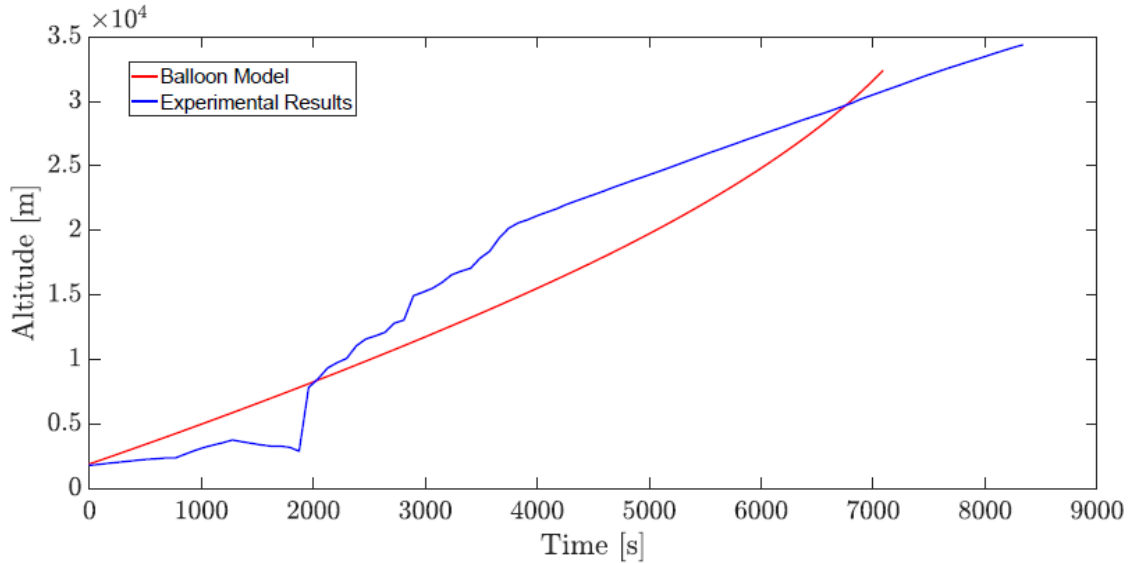


Figura 3. Evolución de la altitud con el tiempo

El perfil de los datos experimentales difiere de los resultados del simulador debido a varias razones. La primera gran disparidad se debe a un malfuncionamiento del sistema de geolocalización hasta alcanzar los 4000 m.

Desde ese punto, la evolución del lanzamiento experimental sigue una trayectoria diferente causada en mayor medida por la presencia de defectos e irregularidades intrínsecas del material del globo que causaron una expansión anisotrópica del sistema. Una vez que el globo se expande por completo, se puede apreciar que este presenta un perfil lineal. En este punto, la expansión del globo es completa y el único parámetro que tiene efecto es la temperatura.

Como puede ser apreciado en la gráfica de la figura 3, el globo del experimento se encuentra sobre expandido si lo comparamos con el caso teórico. Esto se justifica de dos maneras, la primera es por la ausencia de modelo térmico, la temperatura dentro del globo es superior a la simulada y los defectos del material que le proveen una mayor expansión de la misma manera.

Una de las conclusiones importantes de este conjunto de resultados es la independencia de la altitud del globo con respecto al viento. Esto se debe a las características del archivo provisto por NOAA que carece de información en dirección perpendicular al terreno y solo provee viento bidimensional, lo que nos permite eliminar la incertidumbre de las predicciones meteorológicas en la trayectoria vertical.

3.2 Proyección horizontal de la trayectoria

En la Figura 4, la proyección de la trayectoria no se asemeja en nada a la del simulador. Este resultado se ha incluido en este trabajo, para poner de relieve la importancia de la incertidumbre debida a los datos de predicción meteorológica.

Tras intentar obtener los datos de viento del día del lanzamiento del globo, se descubrió la ausencia de un total de diez días previos al lanzamiento en la base de datos del NOAA. Por lo tanto, la predicción disponible más cercana al día del lanzamiento fue emitida un total de once días antes del día de interés. Esto produce que los resultados sean tan diferentes de los experimentales y hace que se requiera un nuevo experimento para validar el simulador.

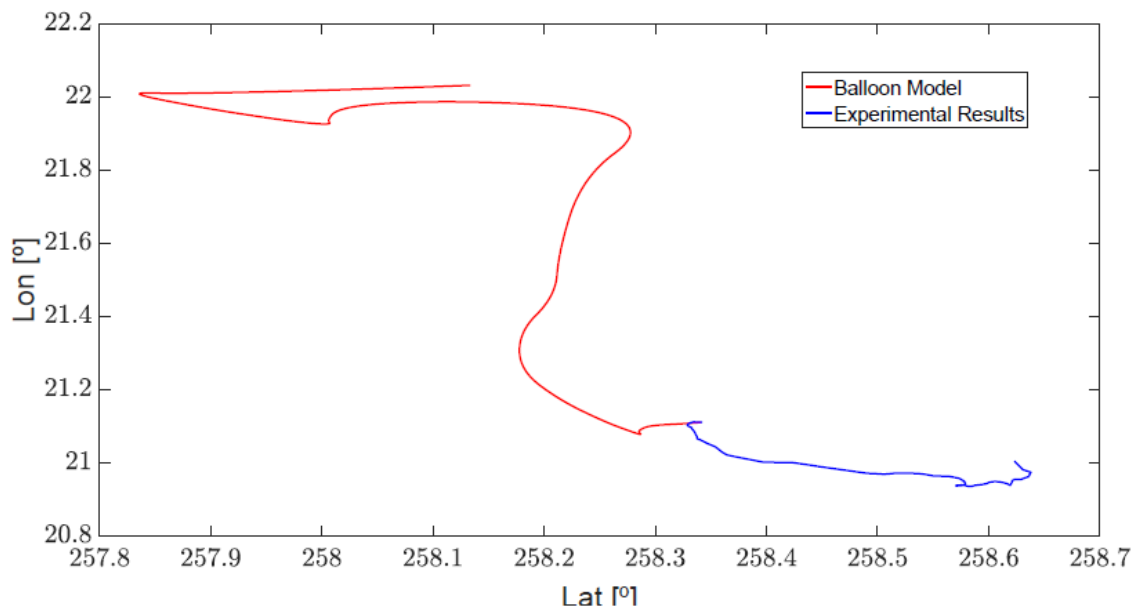


Figura 4. Proyección sobre plano de longitud-latitud de la trayectoria

3.3 Incertidumbre meteorológica

Para comprender el efecto de la incertidumbre en su totalidad, la Figura 5 muestra la solución de todas las predicciones incluidas en la predicción de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), conocidas como “ensambles” [4]. Dichos “ensambles”, como se ha indicado antes, son diferentes predicciones con pequeñas alteraciones entre una y otra, que permiten caracterizar la incertidumbre de la predicción y acotar las posibles trayectorias del globo de acuerdo a la variabilidad meteorológica.

En este caso se utilizaron datos de un día cualquiera, del que se tenían datos de tiempo real, así pues, la predicción fue emitida en el mismo momento que el simulador fue lanzado. Tras solo dos horas de simulación, la incertidumbre de estos datos puede ser apreciada ya que se alcanza un total de 10 km de distancia entre predicciones. Al aumentar el tiempo entre el lanzamiento y la emisión de la predicción dicha incertidumbre aumenta. Para optimizar el análisis de la trayectoria, se recomienda que el tiempo entre predicción y lanzamiento sea el mínimo posible.

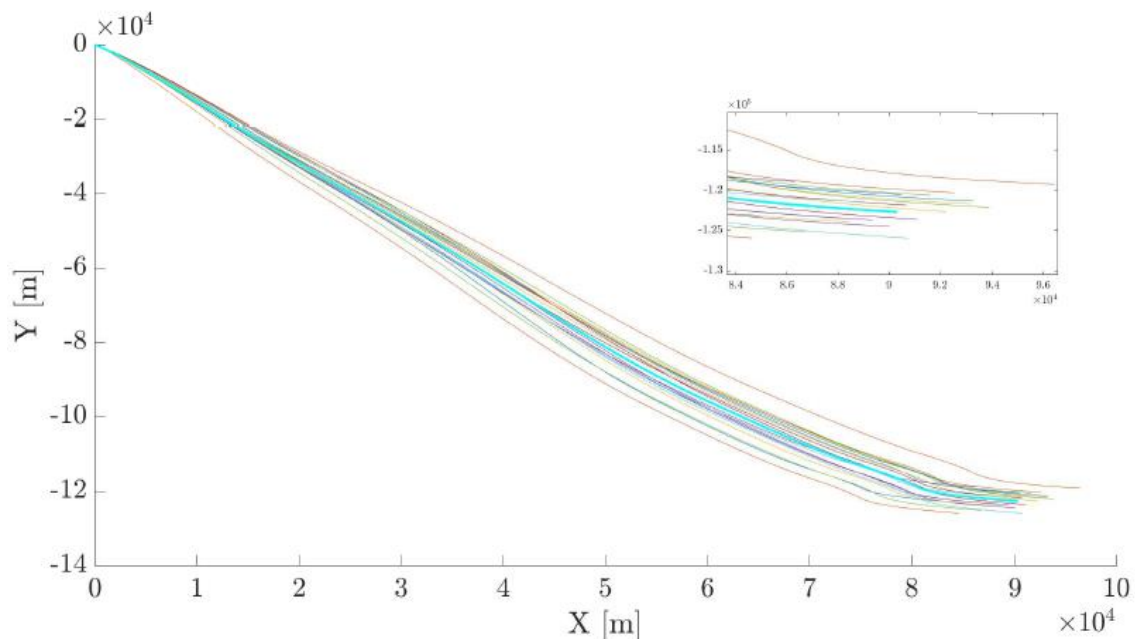


Figura 5. Solución de ensambles, incertidumbre de predicción meteorológica

3.4 Incertidumbre asociada al proceso de llenado

El llenado del globo es otro de los parámetros que introducen incertidumbre en el sistema. Se trata de un complejo proceso, el cual se debe llevar a cabo con precisión ya que es bastante difícil asegurar qué cantidad de helio hay dentro del globo. Dicha incertidumbre aumenta debido a la imprecisión con la que los proveedores de helio trabajan a la hora de distribuir el producto.

Así mismo las medidas del volumen del globo son complejas debido a que normalmente el globo posee anisotropía y defectos difíciles de medir. Para valorar dichos defectos, se simuló una serie de vuelos con la única variabilidad del contenido inicial de helio que cargaban, obteniendo los resultados mostrados en las figuras 6 y 7.

Los dos parámetros que varían confirman el cambio en la cantidad inicial de helio y que tendrán un efecto en la aceleración del globo son tanto el área como el volumen del globo. Ambos presentan un efecto en el arrastre y la flotación respectivamente. El resultado final es que el globo con mayor cantidad de helio

asciende más rápidamente. El globo con mayor cantidad de helio poseerá un mayor radio durante la trayectoria y durante los cambios de dirección su radio de giro será menor, siendo que experimentará una mayor fuerza de arrastre. En las figuras 6 y 7 se muestra de manera gráfica la evolución de la trayectoria en función del volumen de helio, así como la proyección de la trayectoria en función del volumen de helio en el HAB.

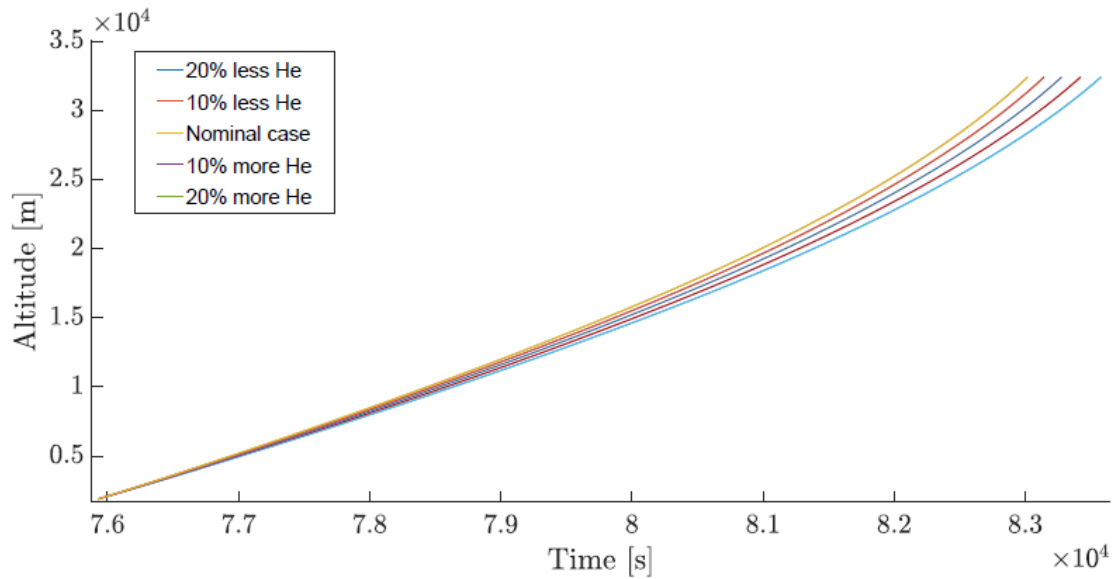


Figura 6. Evolución de la altitud con el tiempo con diferentes cantidades iniciales de helio

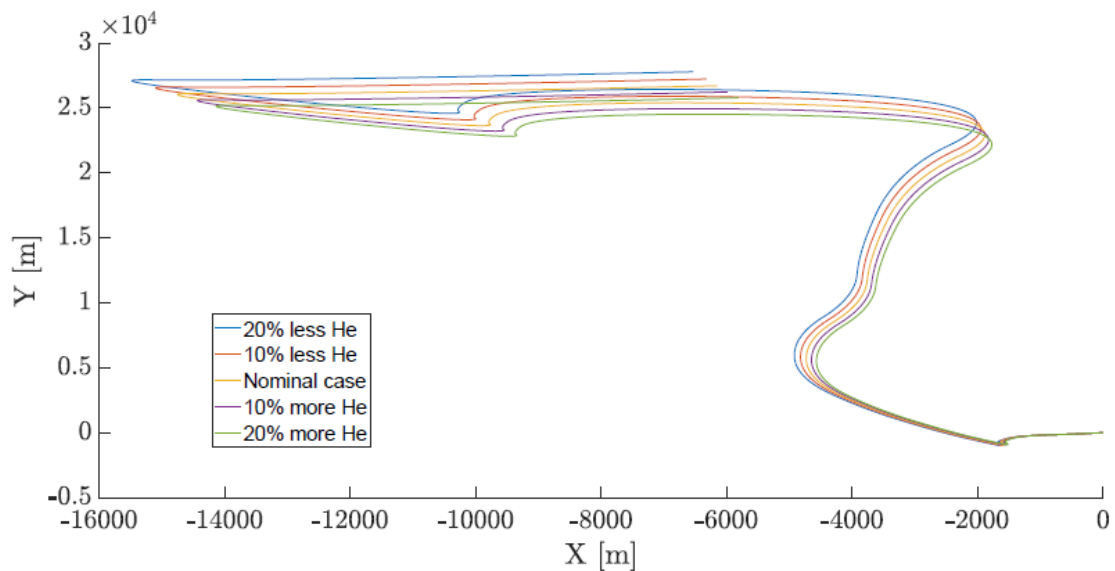


Figura 7. Proyección de la trayectoria para diferentes cantidades iniciales de helio

3.5 Optimización

Una vez el simulador está definido en su totalidad y la dependencia de los diversos parámetros ha sido establecida y comprendida, es posible implementar la optimización.

El objetivo del HAB en las misiones experimentales es ascender, adquirir datos y finalmente descender a tierra para recuperar dichos datos. El sistema carece de ningún tipo de control a bordo así que la totalidad del vuelo será definida variando los parámetros iniciales definidos en el lanzamiento. Esto da lugar al interés de optimizar dichos parámetros iniciales para obtener la mejor la trayectoria.

En la figura 8 se describe de manera general, el proceso de optimización planteado para el simulador de trayectoria en función de sus entradas. Es importante observar la interrelación de los procesos involucrados, así como del lazo de realimentación del esquema.

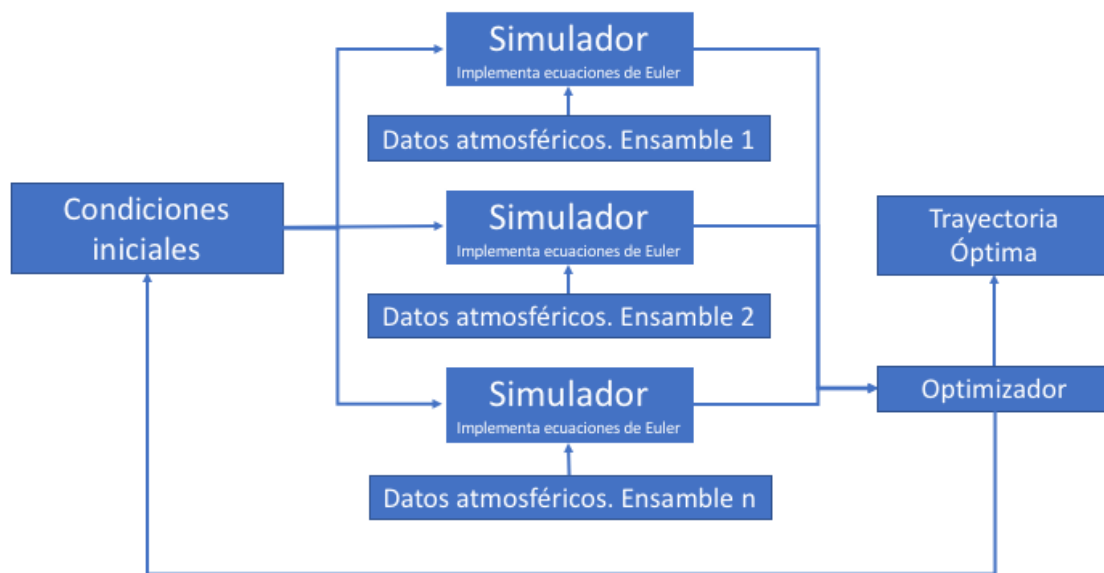


Figura 8. Descripción del proceso de optimización del simulador de trayectoria.

El optimizador es capaz de decidir cuáles son las mejores condiciones iniciales de lanzamiento en términos de localización y llenado inicial del globo para alcanzar un destino concreto. Ésta sería su función más básica y la que puede apreciarse en la figura 7, en la cual podemos observar la variación de la trayectoria nominal desde un punto aleatorio decidido para el lanzamiento y cuál sería el punto óptimo para alcanzar la zona de aterrizaje óptima.

La programación del simulador permite de manera sencilla para el usuario modificar el optimizador para elegir diferentes parámetros a optimizar, como por ejemplo la dispersión del globo respecto a su lugar original de lanzamiento o incluso, incluir sugerencias respecto al mejor momento del día para lanzar.

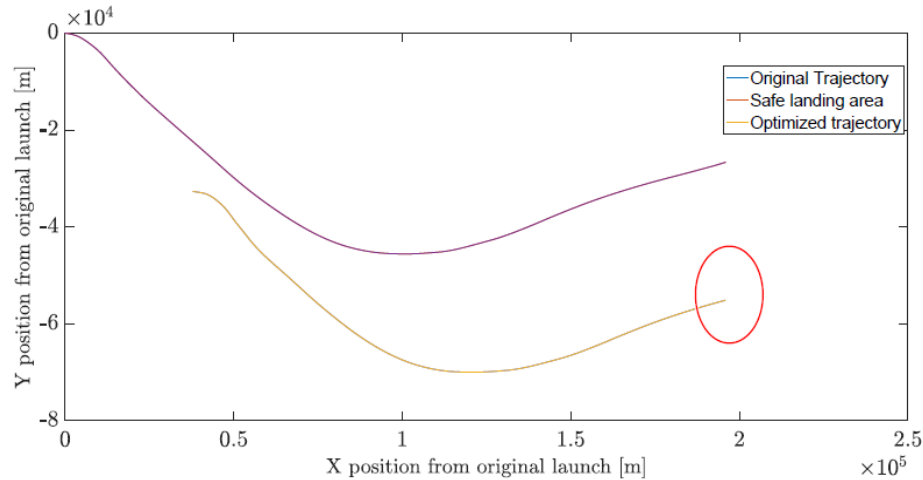


Figura 1. Resultado optimización trayectoria, proyección sobre plano longitud-latitud

4 CONCLUSIONES

Sin duda el uso de plataformas suborbitales basadas en globos meteorológicos, actualmente representa un medio importante y razonablemente económico que no solo coadyuva al registro de datos sobre variables atmosféricas para uso en la generación de pronósticos climatológicos, sino también plataformas experimentales para la validación de componentes y sistemas electrónicos, los cuales posteriormente podrían ser considerados para su integración en dispositivos para uso en ambiente espacial. Dicha opción se perfila como un medio altamente rentable para su uso comercial y de investigación científica, no obstante, se debe trabajar intensamente en la implementación de esquemas que permitan asegurar su seguimiento y recuperación.

El desarrollo de herramientas como el simulador que se describió en este artículo, permite agregar a la misión suborbital, la posibilidad de un seguimiento y rastreo, basado en datos de pronósticos climatológicos y de otros elementos finos, tales como el volumen de helio y otras consideraciones de la instrumentación del globo, así como la ventaja de implementar esquemas de optimización las cuales, generalmente no están incluidos en las herramientas ya disponibles comercialmente, y que pueden representar un ahorro económico importante en los recursos necesarios para la realización de estas experiencias a la estratósfera.

REFERENCIAS

- [1] [Ncdc.noaa.gov](https://www.ncdc.noaa.gov). (2017). *Global Forecast System (GFS) | National Centers for Environmental Information (NCEI) formerly known as National Climatic Data Center (NCDC)*. [online] Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.
- [2] N. YAJIMA, T. IMAMURA, N. IZUTSU, AND T. ABE, *Engineering Fundamentals of Balloons*, Springer New York, New York, NY, 2009, pp. 15–75.
- [3] Q. LIU, Z. WU, M. ZHU, AND W. XU, A comprehensive numerical model investigating the thermal-dynamic performance of scientific balloon, *Advances in Space Research*, 53 (2014), pp. 325 – 338.
- [4] [Ncdc.noaa.gov](https://www.ncdc.noaa.gov). (2017). *Global Ensemble Forecast System (GEFS) | National Centers for Environmental Information (NCEI) formerly known as National Climatic Data Center (NCDC)*. [online] Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-ensemble-forecast-system-gefs>.