

Capítulo 6.

Altimetría

6.1 Altimetro

6.2 Presiones referenciales

6.3 Ejemplo práctico de altimetría

6.1 Altímetro

El altímetro es el instrumento que determina la distancia vertical de la aeronave con respecto a un nivel de referencia fijo. Aunque hay altímetros de varias clases, la mayoría están basados en las diferencias de presión vertical que se presentan en los distintos niveles de la atmósfera. En 1648, Blas Pascal estableció por primera vez la posibilidad de utilizar las variaciones de presión tomadas del barómetro de Torricelli con el fin de medir diferencias de altura. El posterior invento del barómetro aneroide por Lucien Vidie permitiría en 1930 el diseño de los primeros altímetros con fines aeronáuticos.

Como se especificará más adelante, el altímetro compara las diferencias de presión entre la capa de aire que sobrevuela y un nivel de referencia, y traduce tales datos en términos de distancia vertical y entendibles para la tripulación: altura, altitud y nivel de vuelo de la aeronave.

Los altímetros normalmente están duplicados –uno para el piloto y otro para el copiloto– y sus características pueden variar (figura 38). En el caso del C-130, esta aeronave cuenta con tres altímetros: el altímetro del piloto, el cual muestra la presión en pulgadas de mercurio (29,80) y en milibares (1009), mientras que el altímetro del copiloto y del navegante¹² solo tiene la opción de pulgadas de mercurio. La altitud se muestra en una ventanilla compuesta por dos secciones: la primera sección corresponde a los miles de pies, y la segunda a cientos de pies. La misma altitud es registrada por la única aguja con la que cuenta este instrumento. En el ejemplo mostrado en la figura 38b, la aguja indica 1 640 ft.



Figura 38. Tipos de altímetro.
Fuente: elaboración propia.

El helicóptero Arpía FAC 4135 tiene un altímetro que envía señales de altura al transpondedor. Tiene la capacidad de medir distancias entre -1 000 y 50 000 ft; la primera ventana de la izquierda mide la distancia vertical en miles de pies y la segunda en cientos

¹² Parte de la tripulación que tiene como función principal definir las rutas, altitudes y procedimientos para realizar un vuelo óptimo y seguro.



de pies, señalando así la misma cantidad que muestra la única aguja con la que cuenta este instrumento. En el caso de la figura 38a, el altímetro del Arpía indica 3 120 ft.

A diferencia de las otras aeronaves, el altímetro del Kfir posee dos sistemas de navegación. En este caso, se muestra el *Backup Flight Instrument* (BFI), que permite que el piloto interactúe con el instrumento al ajustar la presión de referencia, la cual se visualiza en pulgadas de mercurio (29,84) y en milibares (1011). El caso de ejemplo muestra 500 ft; esta casilla se va incrementando hasta la altura real en la que se encuentra el piloto, y puede llegar a más de 50 000 ft.

6.1.1 Diseño básico del altímetro

Por intermedio de las tomas estáticas, el altímetro mide la presión atmosférica de la capa de aire y la compara con la presión o nivel de referencia entregada a los pilotos por parte de los controladores aéreos, para luego traducir esta medida en términos de distancia vertical. Su funcionamiento está basado en la estrecha relación entre las diferencias de presión que existen a diferentes alturas. La calibración de su escala está hecha bajo condiciones de atmósfera estándar y, en consecuencia, sólo indicará valores reales cuando se den estas condiciones.

La diferencia entre estas dos presiones es medida por el *diafragma* y provoca un movimiento mecánico conectado a un sistema de relojería (figura 39). Dicho sistema transforma unidades de presión a unidades de fácil interpretación para el piloto (unidades de distancia vertical), sin olvidar que esa distancia está directamente relacionada a la presión de referencia calada por el piloto en el altímetro.

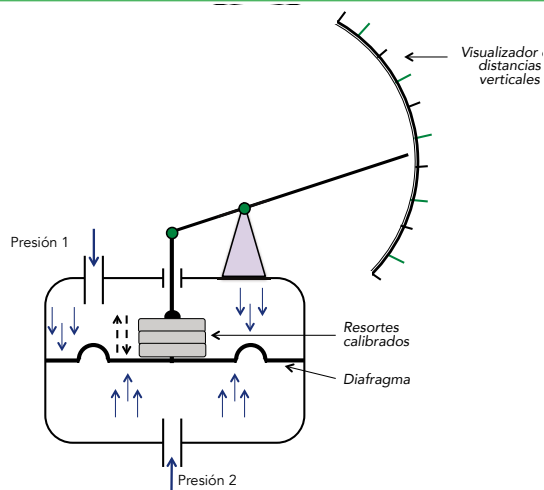


Figura 39. Esquema simple del funcionamiento del altímetro.

Fuente: elaboración propia.

El altímetro no es el único instrumento de vuelo que requiere datos de presión para su funcionamiento. Junto con el *anemómetro* o *velocímetro* (indicador de velocidad horizontal) y el *variómetro* (indicador de velocidad vertical), están conectados a las mismas tomas estáticas que permiten la entrada de aire al sistema de medición de cada instrumento. La presión externa disminuye o aumenta según la aeronave ascienda o descienda, de tal

manera que el altímetro y el variómetro traducen estos cambios de presión en altitud y velocidad de ascenso o de descenso.

El velocímetro es el único de los tres instrumentos que requiere la presión dinámica y estática para su funcionamiento. Basado en el principio de Bernoulli, transforma la diferencia entre la presión estática y la presión dinámica del aire en unidades de velocidad.

86

El sistema Pitot de toda aeronave (figura 40) se compone por el tubo Pitot y las tomas estáticas. Mientras que el tubo Pitot mide la presión de impacto –pues al estar directamente enfrentado al viento relativo depende de la velocidad del flujo de aire–, las tomas estáticas están ubicadas de forma perpendicular al flujo y son totalmente independientes de cualquier otra variable.

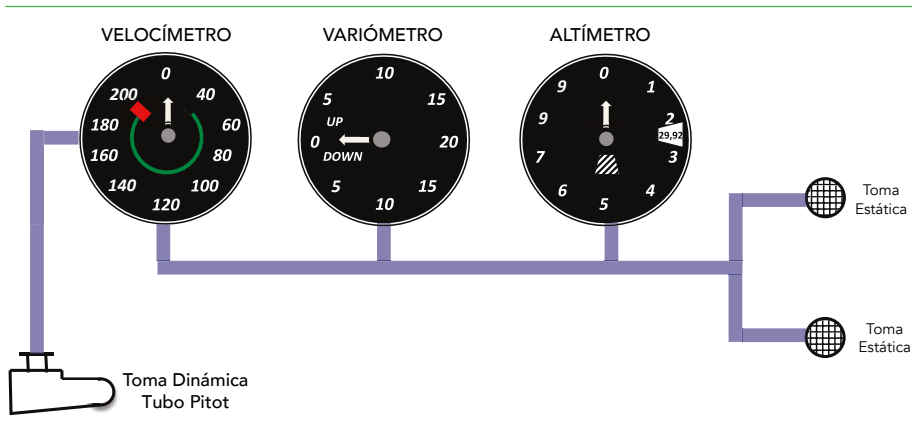


Figura 40. Instrumentos que funcionan con la presión atmosférica.

Fuente: elaboración propia.

6.1.2 Errores del altímetro

- **Error de escala:** se presenta cuando el altímetro no representa correctamente la relación entre presión y altitud, sobrepasando los límites de tolerancia.
- **Error mecánico:** se identifica porque, en superficie, la diferencia de presiones entre la toma estática de la aeronave y el QNH de referencia reportado por la torre de control debe corresponder en términos de distancia a la elevación del aeródromo. Si esta diferencia es superior a 75 ft, la misión debe cancelarse.
- **Error de fricción:** se causa por el roce entre las piezas móviles del mecanismo al exponerse a ciertos niveles de vibración, con un régimen de disminución de la presión de aproximadamente 750 ft por minuto.
- **Error de histéresis:** causado por la deformación del material después de vuelos largos a grandes alturas. Es como un acostumbramiento de la cápsula aneroide a su nueva posición, que retarda el cambio de la indicación.

Mediante la enmienda de mantenimiento al RAC 43 implementado en UAEAC (2016), el Reglamento Aeronáutico Colombiano (RAC) contempla la realización de varios tipos de pruebas a los altímetros con el fin de detectar estos y otros errores.



6.2 Presiones referenciales

Las presiones de referencia (figura 41) son, como su nombre lo indica, una referencia a cierto nivel de presión dado sin tener en cuenta las variaciones reales de la temperatura y considerando una atmósfera estándar. El piloto necesita las presiones de referencia para calcular distancias verticales. Las tres más utilizadas en aviación son:

87

QNH. Presión atmosférica que se está presentando en ese momento al nivel medio del mar. En otras palabras, es la presión atmosférica que tendría el aeródromo si estuviera ubicado en la misma posición geográfica, pero a nivel del mar. Se calcula por los instrumentos meteorológicos de los ATS, partiendo del dato de presión atmosférica del aeródromo. Las cartas de navegación y aproximación a los aeródromos están basadas en este nivel de referencia; por ello, todos los pilotos deben solicitar el QNH al despegar o aterrizar. En tierra y usando QNH, el altímetro debe indicar la elevación real del aeródromo; el piloto debe aceptar un error máximo de 75 ft, tal cual como se indicaba anteriormente en el error mecánico del altímetro. A la distancia entre la presión registrada por las tomas estáticas y la presión QNH se le denomina *altitud*.

QNE. A diferencia del QNH, que varía de un punto a otro, el QNE es constante, es conocido como la isobara¹³ estándar a nivel medio del mar y su valor siempre será 29,92 "Hg o 1013 mb. Generalmente es usada en sitios donde las aeronaves no tienen control ATS, en los largos vuelos internacionales y por encima de cierta altitud. Cuando una aeronave vuela ajustada a la presión de referencia QNE se dice que se encuentra en un FL (Flight Level), siempre expresado en centenares de pies. De acuerdo a lo anterior, el *nivel de vuelo* es la distancia vertical de la aeronave a la isobara estándar 29,92 "Hg.

QFE. Es la presión atmosférica medida directamente en el aeródromo. Su uso normalmente se limita a vuelos acrobáticos donde el altímetro debería indicar 0 ft al despegar o aterrizar, ya que la presión de la toma estática de la aeronave y la del aeródromo es la misma. A la distancia vertical entre la aeronave y el QFE se le denomina *altura* y siempre se expresa en pies AGL (*above ground level*) o ASFC (*above surface*).

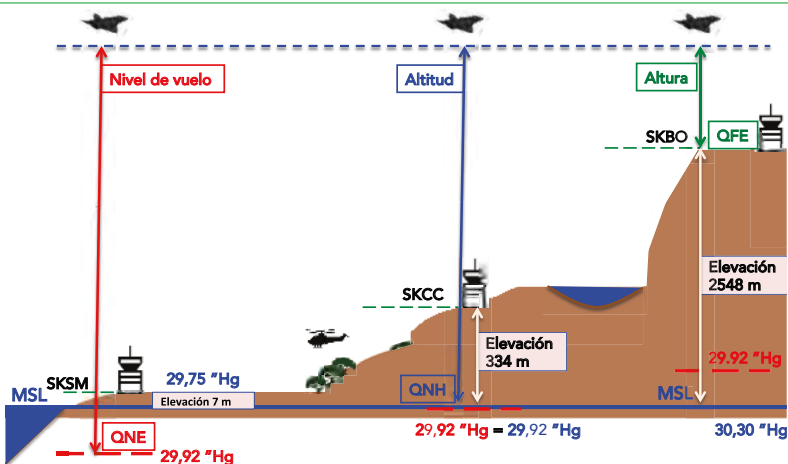


Figura 41. Presiones referenciales.

Fuente: elaboración propia.

13 Línea imaginaria que une puntos con igual presión atmosférica.



Otro término utilizado para definir distancias verticales es la elevación, aunque nada tiene que ver con aviación. La elevación indica la distancia vertical entre el nivel medio del mar y un punto en la superficie terrestre.

6.2.1 Calaje del altímetro

88 Los reglamentos aeronáuticos establecen que todas las aeronaves deben volar con la misma presión de referencia, caladas¹⁴ con QNH si están en un radio de 150 km con el aeródromo más cercano, y con QNE si no disponen de información QNH o se encuentran por encima de 18 000 ft. Este procedimiento garantiza que los cambios de presión atmosférica influirán por igual a todas las aeronaves, manteniendo entre ellas una altura de separación segura.

Cuando se está en ascenso, el piloto puede llegar a la denominada *altitud de transición* (figura 42), la cual marca la transición o cambio entre el uso de altitudes (calando QNH en el altímetro) y el uso de niveles de vuelo (calando QNE). Situación contraria ocurre cuando se está en descenso y se abandonan los niveles de vuelo, se cruza el *nivel de transición* y se cala el altímetro en QNH nuevamente.

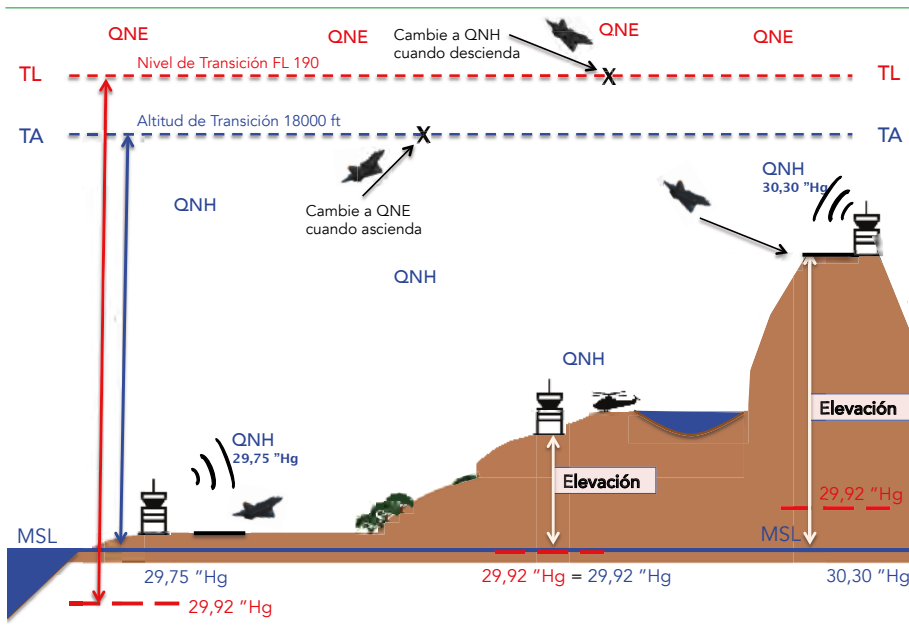


Figura 42. Altitud y nivel de transición.

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a lo anterior, la regulación entre el uso de QNH y QFE está definida por:

Altitud de Transición (TA). La TA es la altitud máxima por debajo de la cual los pilotos están obligados a realizar el ajuste del QNH (ajuste del altímetro de acuerdo a las condiciones atmosféricas locales). La TA puede variar según las características topográficas de cada país; en Colombia, la TA es de 18 000 ft.

14 Término para referirse al uso de un nivel de referencia. También puede utilizarse el término de ajuste altimétrico o presión de referencia.



Nivel de Transición (TL). El TL es el nivel de vuelo mínimo por encima del cual las tripulaciones están obligadas a realizar el ajuste del QNE (ajuste del altímetro basado en la isobara estándar de 29,92 "Hg). El TL siempre estará por encima de la TA, separado a una altura segura. En Colombia, el primer nivel de vuelo es el FL 190.

Capa de Transición. Es el espacio existente entre la TA y el TL, el cual puede variar desde cero pies hasta la máxima diferencia entre la isobara del nivel medio del mar y la isobara estándar 29,92 "Hg. Para garantizar una altura de transición segura, la última TA autorizada en Colombia es de 18 000 ft, y el primer FL corresponde al FL 190.

A continuación se presenta un ejemplo de cómo la TA puede variar de acuerdo a las condiciones atmosféricas presentes en el aeródromo. En la parte izquierda de la figura 44, el QNH es 29,75 "Hg y el ajuste estándar 29,92 "Hg, para una diferencia de 0,17 "Hg, los cuales se convierten en 170 ft. El primer FL disponible por encima de 18 000 ft es FL 190 (19 000 ft). Como la isobara de 29,92 está por debajo del nivel medio del mar, los 170 ft de diferencia se restan a los 1000 ft de la capa de transición normal, lo cual garantiza una separación de 830 ft entre la última altitud de transición y el primer nivel de vuelo disponible.

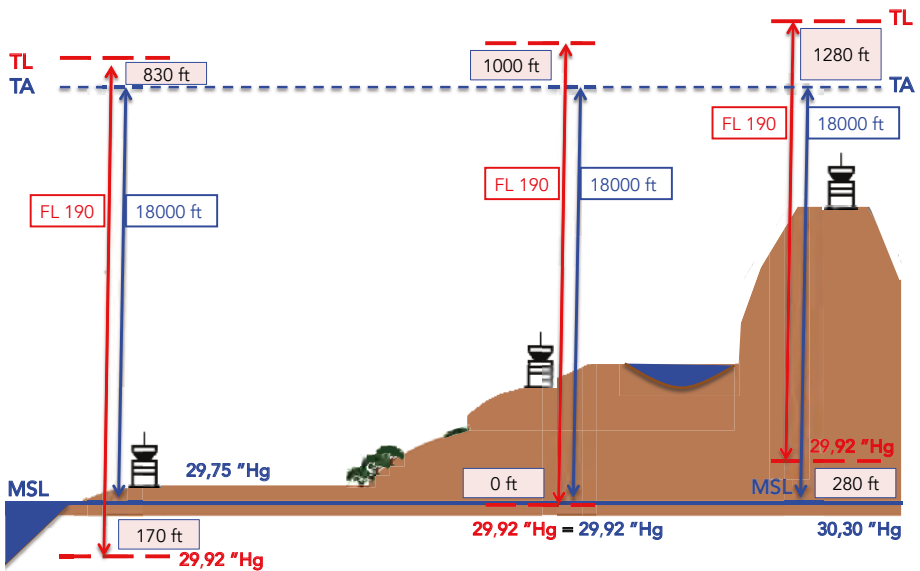


Figura 43. Cambios en el nivel de transición.
Fuente: elaboración propia.

En la parte central, el QNH es 29,92 "Hg, por lo que no hay diferencia con el ajuste estándar que equivale a los mismo 29,92 "Hg. Esto implica que permanecen 1 000 ft de diferencia entre el FL 190 y TA 18 000 ft.

En la parte derecha, el QNH es 30,30 "Hg y el ajuste estándar 29,92 "Hg, para una diferencia de 0,38 "Hg, los cuales representan una diferencia en altitud de unos 280 ft. El primer FL disponible por encima de 18 000 ft es FL 190 (19 000 ft); como la isobara de 29,92 "Hg está por encima del nivel medio del mar, los 280 ft de diferencia se suman a los 1 000 ft de la capa de transición normal, para un total de 1 280 ft de separación.



6.2.2 Errores por cambios de presión y temperatura

Una vez calado el altímetro con el QNH, las aeronaves que sobrevuelan el sector pueden separarse fácilmente debido a que tienen el mismo nivel de referencia al nivel medio del mar, situación que cambia a medida que la aeronave se aleja del aeródromo, lo cual produce errores debido al cambio de la presión atmosférica.

90 Cuando se vuela desde una zona de alta presión a una de baja presión altimétrica¹⁵ (figura 44), el avión desciende aunque la lectura de la altitud sea la misma para el piloto. Tal situación podría generar un accidente si no se hace el respectivo ajuste altimétrico (el piloto cree que tiene más altitud). Lo contrario ocurre cuando el avión vuela desde una zona de baja presión a una de alta presión (el piloto cree que tiene menos altitud). En consecuencia, cuando no se realiza el respectivo ajuste altimétrico y se sobrevuela en una zona de baja presión, la aeronave se encuentra a menor altura de la indicado por el altímetro; por otra parte, cuando se vuela en una presión más alta, la aeronave tendrá una altura real más alta que la registrada por el altímetro.

Igualmente, con una misma presión de referencia ajustada en el altímetro, al desplazarse la aeronave desde un lugar cálido a otro más frío, en este último el altímetro indicará una altitud mayor que la real y viceversa. Siempre que se vuele de altas presiones a bajas presiones, o de altas temperaturas a bajas temperaturas, el altímetro registrará mayor o menor indicación que la distancia real según sea el caso.

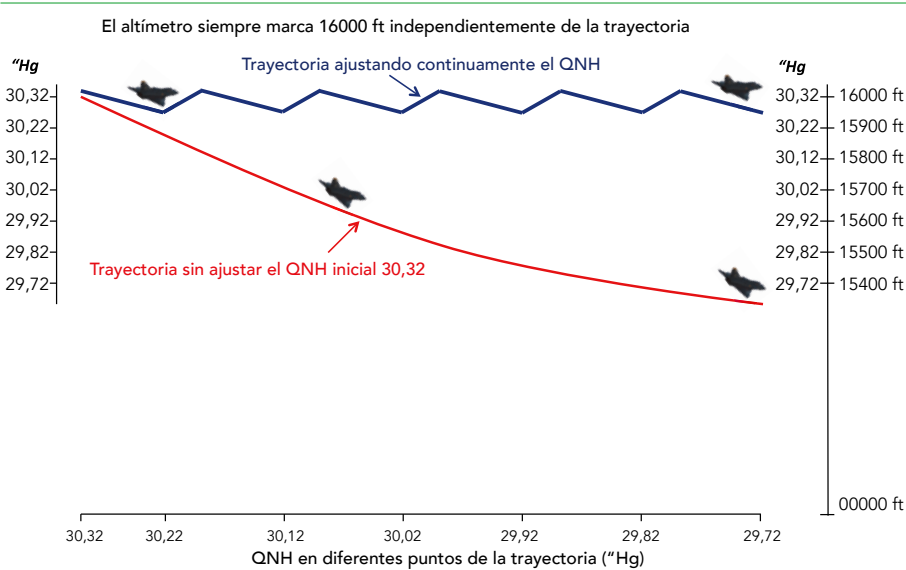


Figura 44. Cambios de presión altimétrica.

Fuente: elaboración propia.

Si la temperatura real de cierta altitud (T_{real}) es diferente a la temperatura estándar que le correspondería dada su distancia a superficie ($T_{std\ de\ FL}$), se presentará sin duda un cambio en la presión atmosférica afectando las indicaciones del altímetro. Para determinar

15 Entiéndase como presión altimétrica a la presión atmosférica de superficie que ha sido ajustada, normalizada o reducida al nivel medio del mar. De esta manera, las diferencias de presiones entre dos puntos pueden calcularse sin tener en cuenta la elevación del punto.



la altitud verdadera es necesario realizar una corrección. El computador Dalton¹⁶ realiza esta corrección mediante el cálculo de la *altitud verdadera*.

$$\text{Altitud verdadera} = \left(\frac{T_{\text{real}}}{T_{\text{std del FL}}} \right) \text{Altitud indicada}$$

Un ejemplo común lo representa la figura 45, en la cual se simula un vuelo de Bogotá a Palanquero, presumiendo un QNH en Bogotá de 30,34 "Hg (mayor presión altimétrica) y un QNH en Palanquero de 29,70 "Hg (menor presión altimétrica). La aeronave podría llegar a accidentarse si no realiza un ajuste altimétrico.

91

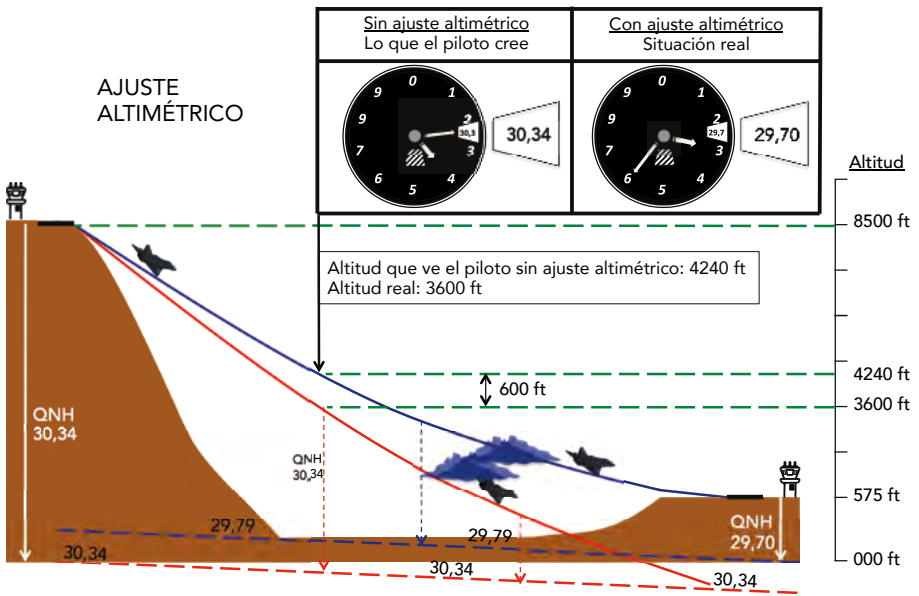


Figura 45. Ajuste altimétrico para evitar errores de altitud.

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta un factor aproximado de conversión de 1 000 ft por cada 1 "Hg, la aeronave podría impactar sobre el terreno si no hace el respectivo ajuste altimétrico, ya que su altitud indicada estaría en 640 ft por debajo de lo real.

$$30,34 \text{ "Hg} - 29,70 \text{ "Hg} = 0,64 \text{ "Hg}$$

$$(0,64 \text{ "Hg}) 1\,000 = 640 \text{ ft}$$

16 El computador Dalton es un instrumento inventado a finales de 1930 por Philip Dalton que sirve para calcular de forma manual el consumo de combustible, corrección del viento, corrección de temperatura, velocidad de la aeronave y muchos otros parámetros que facilitan la planeación segura del vuelo.



6.3 Ejemplo práctico de altimetría

92

La altimetría está inmersa en todas las operaciones aéreas. Para que un piloto logre conocer la distancia de su aeronave a un punto de referencia, deben cumplirse dos pasos:

Primero. Suponiendo que el piloto desea conocer su altitud, los ATS deberán entregarle el QNH de la estación.

Los ATS obtienen el valor de la presión atmosférica en el nivel medio del mar, deduciéndolo de la lectura que un barómetro bien calibrado realiza en superficie y al cual se le aplica una corrección. Esta corrección se hace para cada aeródromo, y está basada en la elevación del punto y la atmósfera estándar; por lo tanto, siempre es la misma. Aunque existen varias maneras de realizar este cálculo, la mayoría de instrumentos incorporan la ecuación de reducción de la presión relacionada en el capítulo anterior:

$$P_{msl} = P_{sfc} \left[\text{EXP} \left(\frac{gz}{RT_m} \right) \right]$$

Donde:

P_{msl} = QNH, o presión reducida a nivel del mar

P_{sfc} = QFE, o presión atmosférica de superficie medida en la estación por un barómetro

g = aceleración de la gravedad ($9,80617 \text{ m} / \text{s}^2$)

R = constante de los gases ($287,04 \text{ m}^2 / \text{s}^2 \text{ K}$)

z = elevación de la estación (en metros)

T_m = temperatura media = $T_k - \left(\frac{0,0065 z}{2} \right)$

T_k = temperatura en superficie ($^{\circ}\text{K}$)

Despejando la ecuación:

$$P_{msl} = P_{sfc} \left[\text{EXP} \left(\frac{gz}{RT_m} \right) \right]$$

$$P_{msl} = P_{sfc} \left[\text{EXP} \left(\frac{gz}{R \left[T_k - \left(\frac{0,0065 z}{2} \right) \right]} \right) \right]$$

$$P_{msl} = P_{sfc} \left[\text{EXP} \left(\frac{gz}{R [T_k - (0,00325 z)]} \right) \right]$$

$$P_{msl} = P_{sfc} \left[\text{EXP} \left(\frac{9,80617 z}{R (T_k) - R (0,00325 z)} \right) \right]$$



$$P_{msl} = P_{sfc} \left[\text{EXP} \left(\frac{9,80617 z}{287,04 T_k - 0,93288 z} \right) \right]$$

Ejemplo:

Suponiendo que el aeródromo se encuentra a 2600 m sobre el nivel del mar y con la ayuda de un barómetro obtienen la presión atmosférica en ese punto e instante, la cual es 23 "Hg con 10 °C de temperatura, hallar el QNH de la estación.

$$P_{msl} = P_{sfc} \left[\text{EXP} \left(\frac{9,80617 z}{287,04 T_k - 0,93288 z} \right) \right]$$

$$\text{QNH} = 23 \left[\text{EXP} \left(\frac{9,80617 (2600)}{287,04 (273 + 10) - 0,93288 (2600)} \right) \right]$$

$$\text{QNH} = 23 \left[\text{EXP} \left(\frac{25496,024}{81232,3 - 2425,5} \right) \right]$$

$$\text{QNH} = 23 [\text{EXP} (0,323525554)]$$

$$\text{QNH} = 23 * e^{0,323525554}$$

$$\text{QNH} = 31,78 \text{ "Hg}$$

Es importante resaltar que el instrumento que reduce la presión en el aeródromo incluye, además, correcciones por gravedad y temperatura no contempladas en el ejemplo anterior.

Segundo. El altímetro debe realizar una diferencia de presiones entre el QNH de 31,78 "Hg suministrado por la torre de control y la presión registrada por las tomas estáticas. Así, un dato de presión se convierte en un dato de distancia vertical.

Los altímetros de tipo Kollsman están calibrados para la atmósfera estándar y, específicamente, para la curva de presiones de la tropósfera. En esta zona, la relación altura–presión se rige por la ecuación:

$$h = \frac{\left(1 - \left(\frac{P_s}{P_{ref}} \right)^{0,19026} \right) 288}{0,00198122}$$

Esta fórmula sólo es válida hasta 36000 ft de altura y está implícita en el altímetro para calcular distancias mediante la diferencia de presiones. P_s es igual a la presión estática registrada por la aeronave; P_{ref} corresponde al valor de la presión altimétrica que los ATS suministran al piloto, y h representa la distancia entre P_s y P_{ref} .

Continuando con el ejemplo anterior, donde los ATS reportaron un QNH de 31,78 "Hg y la toma estática de la aeronave registra una presión atmosférica de 14,77 " Hg, el altímetro puede ahora deducir la altitud de la aeronave.

$$h = \frac{\left(1 - \left(\frac{P_s}{P_{ref}} \right)^{0,19026} \right) 288}{0,00198122}$$

$$h = \frac{\left(1 - \left(\frac{14,77}{31,78} \right)^{0,19026} \right) 288}{0,00198122}$$



$$h = \frac{(1 - (0,86434)) 288}{0,00198122}$$

$$h = \frac{(0,13566) 288}{0,00198122}$$

94 $h = 19720 \text{ ft}$

Respuesta:

Como se está tomando la referencia del QNH, en este caso 31,78 "Hg, la distancia del nivel medio del mar a la aeronave (altitud) es de 19 720 ft.

Es de aclarar que los altímetros de abordaje, por medio del transpondedor ubicado en cada aeronave, emiten constantemente la altitud medida por el instrumento. Esta señal es captada por el receptor de los radares en tierra y codificada de tal manera que los controladores radar puedan conocer la posición y altitud de la aeronave.

En caso de falla del altímetro, ésta será transmitida a los controladores en tierra, quienes estarían recibiendo la misma transmisión errónea del altímetro, tal como sucedió en el accidente del vuelo 603 de AeroPerú el 2 de octubre de 1996 mientras realizaban el vuelo Perú – Chile. En este caso, los pilotos descontrolados por las lecturas erróneas de su altímetro se confiaron en la información errónea que les estaban transmitiendo desde tierra. La causa del fatal accidente, en el cual murieron 70 personas, se debió a una mala inspección exterior de la aeronave, toda vez que olvidaron retirar la cinta adhesiva que cubría las tomas estáticas de la aeronave mientras el proceso de lavado del fuselaje.

