

Apunte teórico:

Competencia Argentina de Tecnología

Descenso pasivo, aerodinámica y absorción de impacto

Material de estudio

Resumen

Este apunte presenta un marco físico y de diseño para analizar el descenso de un objeto liviano sometido a la gravedad, la resistencia del aire y posibles mecanismos pasivos de desaceleración. Se estudian los modelos básicos de caída libre, el efecto del arrastre aerodinámico, la velocidad terminal, el principio de funcionamiento de dispositivos rotativos tipo autogiro y criterios elementales de absorción de impacto.

1. Introducción

Cuando un cuerpo se deja caer desde cierta altura, su movimiento no depende únicamente de la gravedad. En condiciones ideales de vacío, todos los cuerpos caen con la misma aceleración, independientemente de su masa o geometría. Sin embargo, en aire, la forma del objeto, su área expuesta, su orientación, su rugosidad y su capacidad de generar sustentación o arrastre modifican de manera significativa la velocidad de descenso.

En aplicaciones de descenso pasivo, el sistema no utiliza motores ni fuentes activas de propulsión. Su comportamiento queda determinado por la interacción entre el peso del conjunto y las fuerzas aerodinámicas generadas por la propia caída. Esto habilita distintas estrategias: aumentar el arrastre mediante superficies grandes, producir rotación para generar sustentación, disipar energía mediante deformación controlada o combinar varios mecanismos.

El problema físico central puede resumirse en dos preguntas. Primero: ¿a qué velocidad llega el sistema antes del impacto? Segundo: ¿cómo se distribuye y absorbe la energía cinética al momento de tocar el suelo? Reducir la velocidad de descenso disminuye la energía que debe disiparse, pero no elimina la necesidad de una estructura que proteja la carga. Por eso, un diseño eficiente suele combinar aerodinámica y absorción mecánica.

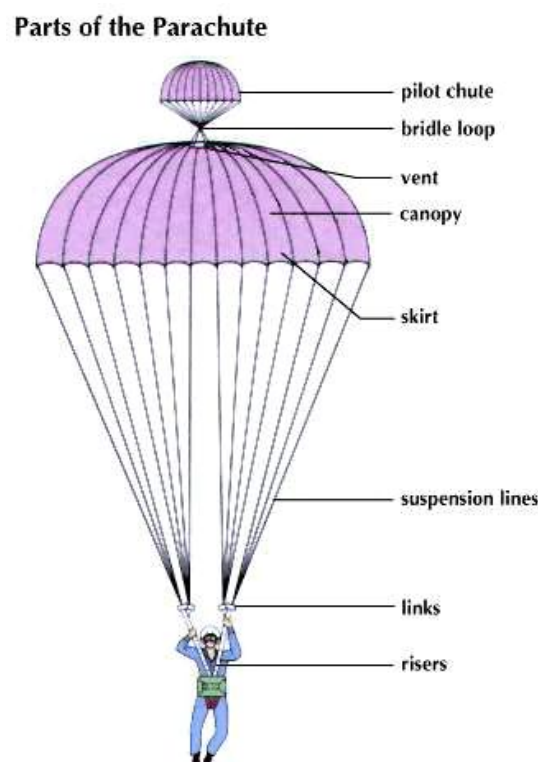


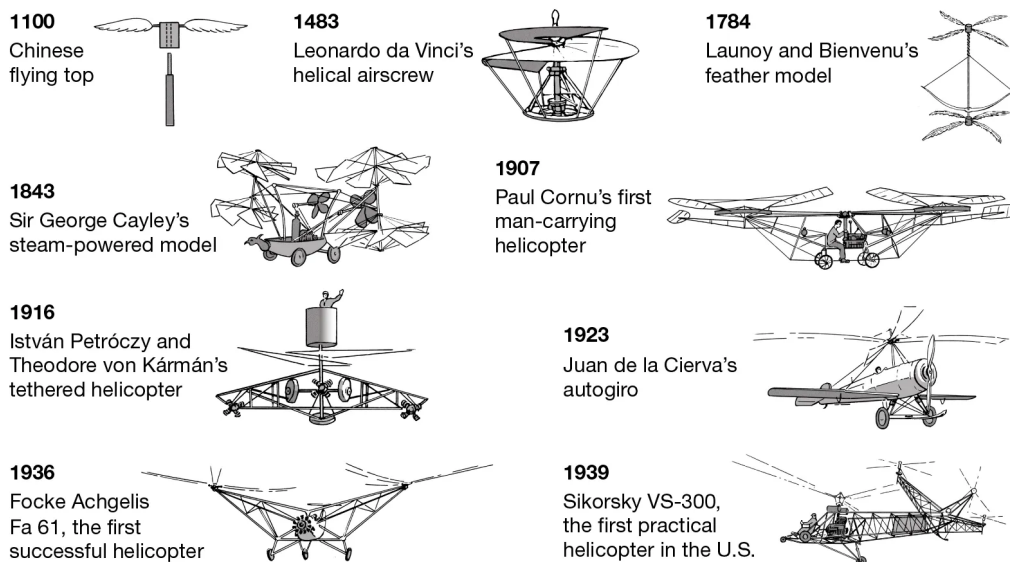
Figura 1: Esquema general de un sistema de descenso pasivo basado en superficies que aumentan el arrastre aerodinámico.

2. Breve historia de los sistemas de descenso controlado

El problema de controlar una caída acompaña a la ingeniería desde mucho antes del desarrollo de los sistemas aeroespaciales modernos. En términos físicos, toda solución de descenso controlado busca modificar el balance entre el peso del cuerpo y las fuerzas aerodinámicas que se oponen al movimiento. Históricamente, estas soluciones pueden agruparse en dos grandes familias: sistemas dominados por arrastre, como los paracaídas, y sistemas sustentadores, como alas, rotores o superficies que generan una fuerza aerodinámica con componente vertical.

Uno de los conceptos más antiguos asociados al vuelo vertical es el rotor. Incluso antes de que existieran aeronaves funcionales, ya se habían propuesto dispositivos inspirados en hélices o tornillos aéreos. La idea básica era que una superficie giratoria podía interactuar con el aire y generar una fuerza vertical. Sin embargo, durante muchos siglos estos conceptos permanecieron en el plano experimental o especulativo, ya que no existían motores suficientemente livianos, materiales adecuados ni una comprensión completa de la estabilidad aerodinámica.

History of the helicopter



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Figura 2: Evolución histórica de configuraciones de ala rotativa, antecedente conceptual de helicópteros y autogiros.

El desarrollo moderno de las aeronaves de alas rotativas tuvo un avance importante con el autogiro, inventado por el ingeniero español Juan de la Cierva en la década de 1920. A diferencia del helicóptero, el autogiro no utiliza un rotor principal motorizado para sostenerse directamente en el aire. Su rotor gira por autorrotación: el flujo de aire ascendente relativo, generado durante el avance o el descenso, hace rotar las palas y permite producir sustentación. Este principio resultó fundamental porque permitía descensos más seguros y reducía el riesgo asociado a la pérdida de sustentación típica de las aeronaves de ala fija a baja velocidad.

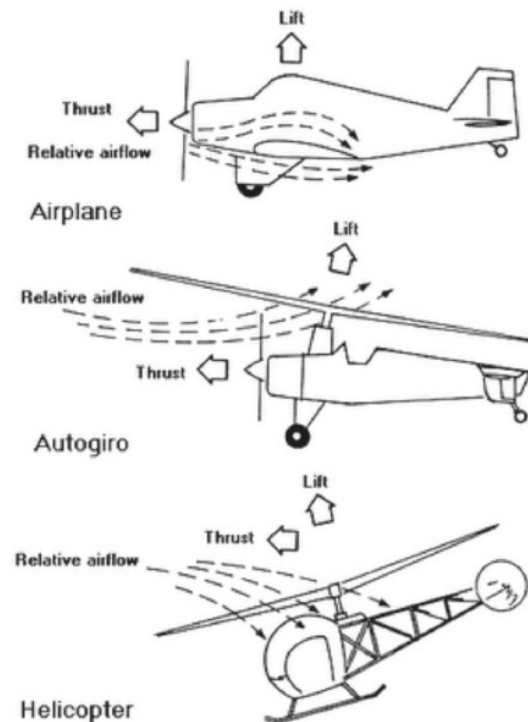


Figura 3: El autogiro tiene una forma diferente de obtener sustentación necesaria para volar que la diferencia de los helicópteros y los aviones.

Desde el punto de vista histórico, el autogiro fue uno de los primeros sistemas exitosos de ala rotativa. Su importancia no reside únicamente en haber permitido vuelos controlados, sino también en haber resuelto problemas técnicos que luego serían esenciales para el helicóptero moderno, como la disimetría de sustentación entre la pala que avanza y la pala que retrocede. La incorporación de articulaciones y grados de libertad en el rotor permitió mejorar la estabilidad del disco rotor y abrió el camino al desarrollo posterior de aeronaves de despegue y aterrizaje vertical.

En paralelo, los paracaídas se consolidaron como sistemas de descenso basados principalmente en arrastre. En este caso, el objetivo no es generar sustentación mediante una superficie que gira o avanza, sino aumentar considerablemente el área efectiva expuesta al flujo de aire. Al incrementar el área y el coeficiente de arrastre, aumenta la fuerza aerodinámica opuesta al peso y disminuye la velocidad terminal. Aunque su principio físico es más simple que el de un autogiro, su desempeño depende fuertemente de la geometría, la estabilidad durante el descenso, la porosidad del material y la sensibilidad al viento lateral.

Los sistemas de descenso pasivo modernos combinan muchas veces ambos enfoques. Algunas configuraciones emplean superficies rígidas que actúan como frenos aerodinámicos; otras usan rotores no motorizados que entran en autorrotación; y otras incorporan estructuras deformables o zonas de absorción de impacto para reducir la aceleración máxima al tocar el suelo. En todos los casos, el criterio de diseño es el mismo: transformar una caída rápida y concentrada en un proceso más lento, estable y controlado, disipando energía mediante interacción con el aire y mediante deformación estructural controlada durante el impacto.

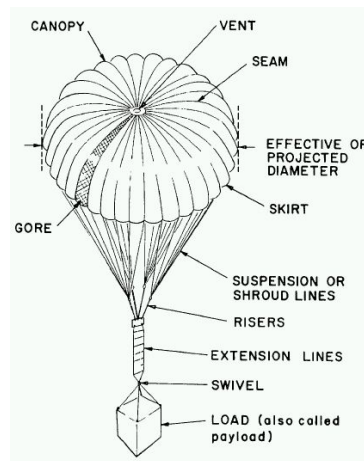


Figura 4: Partes principales de un paracaídas y elementos que influyen en su área efectiva y estabilidad.

Por este motivo, el estudio histórico de los sistemas de descenso no debe entenderse solo como una sucesión de inventos, sino como la evolución de una misma idea física: usar la aerodinámica para administrar la energía potencial gravitatoria. Desde el paracaídas hasta el autogiro, el desafío consiste en diseñar una geometría capaz de aumentar el tiempo de caída, reducir la velocidad de impacto y mantener una orientación suficientemente estable durante el descenso.

3. Modelo de caída libre sin resistencia del aire

El caso más simple es el de un cuerpo que cae verticalmente desde una altura h , partiendo del reposo y sin considerar resistencia del aire. La única fuerza aplicada es el peso:

$$P = mg, \quad (1)$$

donde m es la masa del cuerpo y g es la aceleración de la gravedad. En todos los cálculos de este apunte se adopta el valor aproximado

$$g = 10 \text{ m/s}^2.$$

La aceleración es constante:

$$a = g. \quad (2)$$

Si el cuerpo parte del reposo, la velocidad luego de caer una distancia h viene dada por:

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (3)$$

El tiempo de caída ideal es:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}. \quad (4)$$

Estas expresiones son útiles como referencia superior: si no existiera el aire, un objeto soltado desde 10 m impactaría con una velocidad aproximada de:

$$v = \sqrt{2(10)(10)} \approx 14,1 \text{ m/s}. \quad (5)$$

Desde 15 m, la velocidad ideal sería:

$$v = \sqrt{2(10)(15)} \approx 17,3 \text{ m/s}. \quad (6)$$

Estas velocidades son elevadas para una carga frágil. Por eso, en un descenso real resulta fundamental aumentar las fuerzas que se oponen al movimiento.

4. Resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica o arrastre es una fuerza que se opone al movimiento relativo entre un cuerpo y el aire. Para velocidades moderadas y objetos macroscópicos, suele modelarse como proporcional al cuadrado de la velocidad:

$$D = \frac{1}{2}\rho v^2 C_D A, \quad (7)$$

donde D es la fuerza de arrastre, ρ es la densidad del aire, v es la velocidad relativa, C_D es el coeficiente de arrastre y A es el área de referencia. A nivel del mar, un valor típico de densidad del aire es $\rho \approx 1,17 \text{ kg/m}^3$ a temperaturas moderadas.

El coeficiente C_D no es una constante universal. Depende de la geometría, la orientación, el régimen de flujo y la rugosidad. Por ejemplo, una esfera lisa, una placa plana y una estructura con palas rotativas pueden tener valores muy distintos. En cálculos preliminares, el producto $C_D A$ suele ser más relevante que cada variable por separado, porque representa la “capacidad efectiva” de frenar el movimiento.

4.1. Ecuación de movimiento con arrastre cuadrático

Tomando hacia abajo como sentido positivo, el balance de fuerzas durante la caída vertical es:

$$ma(t) = mg - \frac{1}{2}\rho v^2 C_D A. \quad (8)$$

Aquí, $a(t)$ representa la aceleración instantánea del cuerpo en el instante t . Al comienzo de la caída, si $v = 0$, el arrastre es nulo y la aceleración inicial es aproximadamente $g = 10 \text{ m/s}^2$. A medida que la velocidad aumenta, el arrastre crece como v^2 , reduciendo la aceleración neta.

5. Velocidad terminal

La velocidad terminal se alcanza cuando el peso queda equilibrado por las fuerzas aerodinámicas. En ese punto, la aceleración vertical es nula:

$$mg = \frac{1}{2}\rho v_t^2 C_D A. \quad (9)$$

Despejando la velocidad terminal:

$$v_t = \sqrt{\frac{2mg}{\rho C_D A}}. \quad (10)$$

Esta ecuación muestra relaciones de diseño muy importantes. Si la masa aumenta, la velocidad terminal aumenta. Si el área efectiva aumenta, la velocidad terminal disminuye. Si el coeficiente aerodinámico aumenta, también disminuye la velocidad terminal.

También puede despejarse el área necesaria para alcanzar una velocidad terminal objetivo:

$$A = \frac{2mg}{\rho C_D v_t^2}. \quad (11)$$

Por ejemplo, para un sistema de masa $m = 1,0 \text{ kg}$, densidad del aire $\rho = 1,17 \text{ kg/m}^3$, velocidad objetivo $v_t = 4,6 \text{ m/s}$ y un coeficiente aerodinámico efectivo $C = 1,1$, se obtiene:

$$A = \frac{2(1,0)(10)}{(1,17)(1,1)(4,6)^2} \approx 0,734 \text{ m}^2. \quad (12)$$

Este valor no debe interpretarse necesariamente como área geométrica total de material, sino como área aerodinámica efectiva del sistema. En un dispositivo real, parte de la superficie puede trabajar mal si queda tapada, inclinada incorrectamente o sometida a flujo turbulento.

6. Velocidad promedio de caída

En algunas situaciones se mide el tiempo total de descenso desde una altura conocida. La velocidad promedio se estima mediante:

$$\bar{v} = \frac{h}{t}. \quad (13)$$

Esta velocidad promedio no es necesariamente igual a la velocidad terminal. Si el objeto parte del reposo, primero acelera y luego puede aproximarse a un régimen casi estacionario. En caídas de poca altura, es posible que el sistema no llegue a su velocidad terminal. Por eso, para alturas bajas o moderadas, una predicción más realista debe considerar la evolución temporal.

Para arrastre cuadrático, si el cuerpo parte del reposo y cae verticalmente, la velocidad puede escribirse como:

$$v(t) = v_t \tanh\left(\frac{gt}{v_t}\right), \quad (14)$$

mientras que la distancia recorrida es:

$$y(t) = \frac{v_t^2}{g} \ln \left[\cosh\left(\frac{gt}{v_t}\right) \right]. \quad (15)$$

Estas ecuaciones permiten estimar el tiempo de caída resolviendo $y(t) = h$. Si no se quiere resolver numéricamente, puede usarse una aproximación práctica: calcular v_t con la ecuación (10), medir o estimar el tiempo de caída experimentalmente y luego ajustar el coeficiente aerodinámico efectivo.

7. Descenso mediante superficies de alto arrastre

Una primera familia de soluciones pasivas consiste en aumentar el arrastre. El principio es simple: incrementar el producto $C_D A$ para reducir la velocidad terminal. Dentro de esta familia aparecen placas, conos, cúpulas, frenos aerodinámicos rígidos, estructuras tipo canasta, superficies desplegadas y configuraciones similares.

7.1. Paracaídas y superficies equivalentes

Un paracaídas funciona principalmente aumentando el área frontal y generando una región de alta presión debajo de la cúpula. Su modelo más simple usa nuevamente la ecuación de velocidad terminal:

$$v_t = \sqrt{\frac{2mg}{\rho C_D A}}. \quad (16)$$

El paracaídas ideal reduce mucho la velocidad, pero tiene desventajas de diseño: puede ser sensible al viento, puede oscilar, puede no desplegarse correctamente y puede generar deriva horizontal. Además, si se busca precisión de aterrizaje, una superficie muy grande puede aumentar el desplazamiento lateral.

En el caso de superficies rígidas o semirrígidas, el problema principal es lograr una alta área efectiva sin aumentar excesivamente la masa. Un diseño más grande no siempre es mejor: si el aumento de área viene acompañado de un aumento significativo de masa, la velocidad terminal puede no mejorar demasiado. La variable clave es la relación entre masa y área efectiva.

7.2. Frenos aerodinámicos rígidos

Los frenos aerodinámicos rígidos son superficies que se oponen al flujo sin necesariamente formar una cúpula. Pueden ser aletas, placas, alas de gran ángulo de ataque o estructuras perforadas. Su ventaja es que pueden integrarse al cuerpo principal y ser estructuralmente simples. Su desventaja es que, si no están bien distribuidos, pueden generar momentos de vuelco o descenso inestable.

Para evaluar una alternativa de este tipo, puede usarse el mismo procedimiento:

1. Medir o estimar la masa total m .
2. Estimar el área de referencia A que enfrenta al flujo.
3. Adoptar un coeficiente aerodinámico razonable C_D .
4. Calcular v_t con la ecuación (10).
5. Comparar esa velocidad con la energía que la estructura puede absorber al impactar.

8. Principio de autogiro

Un autogiro o sistema autorrotante utiliza el flujo de aire producido por la caída para hacer girar un rotor sin motor. La rotación no aparece porque el sistema tenga propulsión propia, sino porque la geometría de las palas transforma parte del flujo ascendente relativo en movimiento angular. Una vez que el rotor gira, las palas generan fuerzas aerodinámicas con componente vertical opuesta al peso.

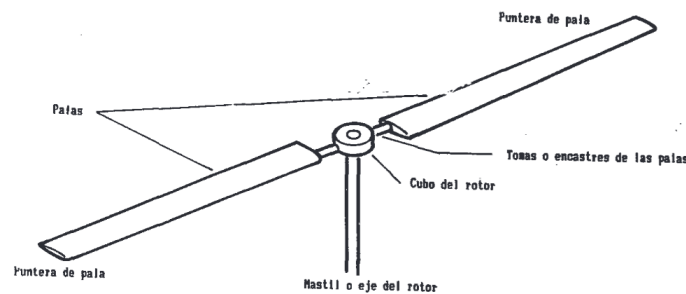


Figura 5: Partes principales de un autogiro y disposición general del rotor.

En un descenso vertical, el aire se mueve hacia arriba en el sistema de referencia del objeto. Las palas inclinadas experimentan una velocidad relativa compuesta por dos contribuciones: la velocidad vertical de caída y la velocidad tangencial debida a la rotación. Esta combinación genera un ángulo de ataque local, y por lo tanto sustentación y arrastre.

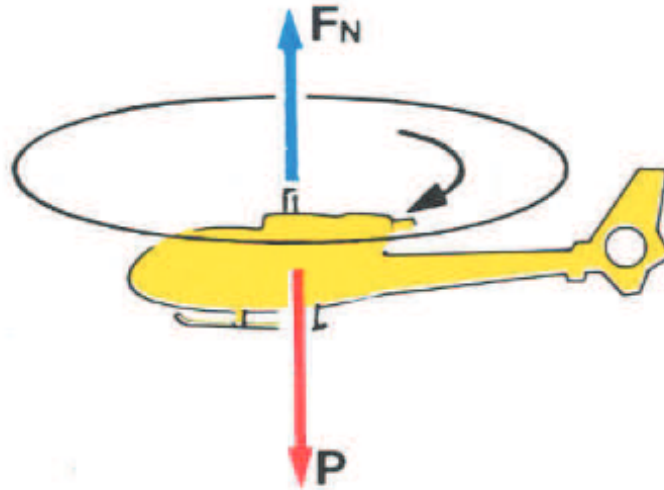


Figura 6: La interacción entre el perfil y el flujo de aire genera una fuerza con componente vertical.

A nivel preliminar, el comportamiento vertical puede aproximarse mediante un balance de fuerzas análogo al de una superficie sustentadora:

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L, \quad (17)$$

donde L es la sustentación efectiva opuesta al peso, S es el área de referencia del rotor y C_L es un coeficiente de sustentación efectivo. En régimen de descenso estabilizado:

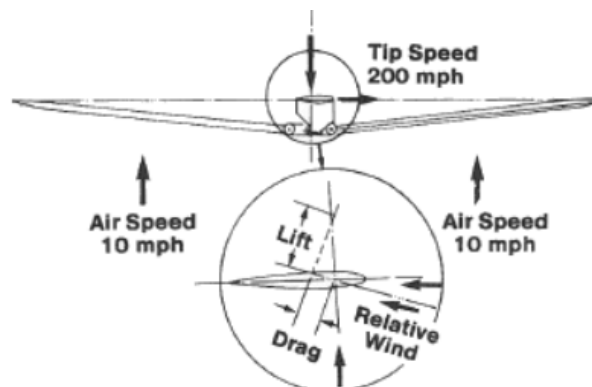


Figura 7: Descomposición aerodinámica en una pala: el viento relativo genera sustentación y arrastre, cuya combinación determina el comportamiento del rotor.

$$L \approx mg. \quad (18)$$

Combinando (17) y (18):

$$\frac{1}{2} \rho v^2 S C_L = mg. \quad (19)$$

De allí se obtiene una expresión equivalente para la velocidad de descenso:

$$v = \sqrt{\frac{2mg}{\rho S C_L}}. \quad (20)$$

Y, si se define una velocidad objetivo, puede despejarse el área efectiva requerida:

$$S = \frac{2mg}{\rho C_L v^2}. \quad (21)$$

Esta formulación es simplificada. En un rotor real, el coeficiente C_L efectivo depende del perfil, el ángulo de las palas, la velocidad angular, la flexibilidad, la distribución radial y la estabilidad del giro. Aun así, la ecuación es útil para estimaciones de primer orden.

9. Área efectiva de un rotor

Para un rotor circular ideal de radio externo r_e , el área barrida es:

$$S = \pi r_e^2. \quad (22)$$

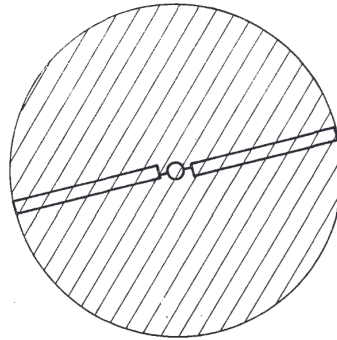


Figura 8: Área de barrido de un rotor: región circular efectiva recorrida por las palas durante la rotación.

Si existe una zona central que no genera sustentación útil, de radio interno r_i , el área anular efectiva puede aproximarse como:

$$S = \pi (r_e^2 - r_i^2). \quad (23)$$

Si el sistema utiliza dos rotores equivalentes, el área total ideal puede estimarse como:

$$S_{total} = 2\pi (r_e^2 - r_i^2). \quad (24)$$

Cuando se trabaja con palas no circulares o con rotores de geometría irregular, el área efectiva puede estimarse como el área barrida por las aspas, no simplemente como la suma del material. Esto es importante: una pala delgada puede barrer un disco grande al rotar, aunque la cantidad de material sea pequeña.

9.1. Ejemplo de cálculo de área requerida

Supóngase un sistema de masa:

$$m = 1,0 \text{ kg}, \quad (25)$$

con $\rho = 1,17 \text{ kg/m}^3$, $C_L = 1,1$ y velocidad objetivo $v = 4,6 \text{ m/s}$. Usando (21):

$$S = \frac{2(1,0)(10)}{(1,17)(1,1)(4,6)^2} \approx 0,734 \text{ m}^2. \quad (26)$$

Si se busca conseguir esa área con un único rotor circular ideal, el radio requerido sería:

$$r_e = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,734}{\pi}} \approx 0,483 \text{ m}. \quad (27)$$

Por lo tanto, el largo radial característico sería aproximadamente 483 mm.

Si se emplean dos rotores ideales iguales, cada uno debe aportar la mitad del área:

$$S_{rotor} = \frac{0,734}{2} = 0,367 \text{ m}^2, \quad (28)$$

por lo que:

$$r_e = \sqrt{\frac{0,367}{\pi}} \approx 0,342 \text{ m}. \quad (29)$$

Esto da un largo radial característico de aproximadamente 342 mm.

Si además se desprecia una región central de radio $r_i = 57,5 \text{ mm}$, usando el área anular doble:

$$S_{total} = 2\pi(r_e^2 - r_i^2), \quad (30)$$

y despejando r_e :

$$r_e = \sqrt{\frac{S_{total}}{2\pi} + r_i^2}. \quad (31)$$

Para $S_{total} = 0,734 \text{ m}^2$ y $r_i = 0,0575 \text{ m}$:

$$r_e \approx \sqrt{\frac{0,734}{2\pi} + (0,0575)^2} \approx 0,347 \text{ m}. \quad (32)$$

La diferencia entre este valor y otras estimaciones posibles aparece por cómo se define el área efectiva, cuánta zona central se descuenta y si se considera área barrida total, área útil de pala o área geométrica de material. En diseños reales, esta distinción debe especificarse con claridad.

9.2. Ejemplo inverso: estimación de C_L efectivo

También puede plantearse el problema inverso. Si se conoce la masa, el área efectiva y una velocidad de descenso estimada o medida, puede despejarse el coeficiente de sustentación efectivo:

$$C_L = \frac{2mg}{\rho v^2 S}. \quad (33)$$

Por ejemplo, para $m = 0,666 \text{ kg}$, $\rho = 1,17 \text{ kg/m}^3$ y $S = 0,7037 \text{ m}^2$:

$$C_L(v = 5 \text{ m/s}) = \frac{2(0,666)(10)}{(1,17)(5)^2(0,7037)} \approx 0,65. \quad (34)$$

Para $v = 6 \text{ m/s}$:

$$C_L \approx 0,45. \quad (35)$$

Para $v = 4,5 \text{ m/s}$:

$$C_L \approx 0,80. \quad (36)$$

Esto muestra una relación clave: para una misma masa y una misma área, lograr menor velocidad requiere un coeficiente aerodinámico efectivo mayor. Dicho de otro modo, no alcanza con tener área; esa área debe trabajar aerodinámicamente de forma eficiente.

10. Estabilidad del descenso

Un sistema de descenso pasivo no solo debe caer lento. También debe caer de manera estable. La estabilidad evita que el objeto se invierta, oscile excesivamente o entre en una trayectoria lateral impredecible.

Desde el punto de vista mecánico, un diseño estable suele cumplir dos condiciones generales. Primero, el centro de masa debe ubicarse por debajo o cerca del eje de suspensión aerodinámica, de modo que el sistema tienda a recuperar una orientación favorable. Segundo, las superficies aerodinámicas deben distribuirse de forma simétrica para evitar momentos laterales no deseados.

En un autogiro, además, se requiere que el rotor inicie y mantenga la autorrotación. Si las palas tienen un ángulo inadecuado, el sistema puede no girar, girar demasiado lento o comportarse como una simple placa. La inclinación de las palas debe permitir que el flujo relativo genere un torque aerodinámico suficiente para sostener la rotación.

10.1. Centro de masa y centro de presión

El centro de masa es el punto donde puede considerarse concentrado el peso del sistema. El centro de presión es el punto efectivo donde actúan las fuerzas aerodinámicas. Si el centro de presión queda muy por debajo del centro de masa, el sistema puede tender

a invertirse. Si queda por encima, la configuración suele ser más estable, de manera similar a una flecha con plumas en la parte posterior.

Para mejorar estabilidad, suelen usarse masas concentradas en la parte inferior, aletas superiores o laterales y estructuras simétricas. Sin embargo, toda mejora estructural implica masa adicional, y la masa penaliza la velocidad terminal. El diseño final requiere compromiso.

11. Energía de impacto y absorción estructural

Aunque la aerodinámica reduzca la velocidad de caída, al llegar al suelo el sistema conserva energía cinética:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2. \quad (37)$$

Esta energía debe disiparse durante el impacto. Si el sistema se detiene en una distancia muy pequeña, la fuerza promedio será alta. Usando trabajo y energía:

$$F_{prom}d \approx \frac{1}{2}mv^2, \quad (38)$$

donde d es la distancia efectiva de frenado durante la deformación. Despejando:

$$F_{prom} \approx \frac{mv^2}{2d}. \quad (39)$$

La conclusión es directa: para reducir la fuerza de impacto se puede disminuir la masa, disminuir la velocidad o aumentar la distancia de frenado. La aerodinámica trabaja sobre la velocidad; la estructura de protección trabaja sobre la distancia de frenado y la distribución de cargas.

Por ejemplo, si un sistema de 0,7 kg impacta a 5 m/s, su energía cinética es:

$$E_k = \frac{1}{2}(0,7)(5)^2 = 8,75 \text{ J}. \quad (40)$$

Si esa energía se disipa en apenas 5 mm:

$$F_{prom} \approx \frac{(0,7)(5)^2}{2(0,005)} = 1750 \text{ N}. \quad (41)$$

Si se logra una deformación controlada de 30 mm:

$$F_{prom} \approx \frac{(0,7)(5)^2}{2(0,030)} \approx 292 \text{ N}. \quad (42)$$

La diferencia es muy grande. Por eso, una estructura que se deforma progresivamente puede proteger mejor que una estructura extremadamente rígida.

12. Criterios de diseño pasivo

Un diseño pasivo eficiente debe equilibrar tres objetivos: reducir la velocidad de descenso, mantener estabilidad y absorber el impacto. Mejorar uno de estos aspectos puede perjudicar otro. Por ejemplo, aumentar el área puede reducir la velocidad, pero también aumentar la sensibilidad al viento. Agregar material puede mejorar la protección, pero aumenta la masa y por lo tanto la energía de impacto.

Un procedimiento razonable de diseño preliminar es el siguiente:

1. Definir una masa estimada del sistema completo.
2. Elegir una velocidad de descenso objetivo.
3. Calcular el área aerodinámica necesaria con un coeficiente estimado.
4. Verificar si las dimensiones resultantes son construibles.
5. Diseñar la estructura de absorción de impacto.
6. Revisar el centro de masa y la estabilidad.
7. Realizar pruebas controladas y ajustar el modelo.

La etapa de prueba es importante porque los coeficientes aerodinámicos son difíciles de estimar con precisión. Una forma simple de calibrar el modelo es medir una caída desde altura conocida, calcular la velocidad promedio y ajustar el valor efectivo de C_D o C_L .

13. Resumen de ecuaciones útiles

Concepto	Ecuación
Aceleración de la gravedad adoptada	$g = 10 \text{ m/s}^2$
Peso	$P = mg$
Velocidad sin aire	$v = \sqrt{2gh}$
Tiempo sin aire	$t = \sqrt{2h/g}$
Arrastre aerodinámico	$D = \frac{1}{2}\rho v^2 C_D A$
Velocidad terminal por arrastre	$v_t = \sqrt{\frac{2mg}{\rho C_D A}}$
Área necesaria para velocidad objetivo	$A = \frac{2mg}{\rho C_D v_t^2}$
Sustentación efectiva	$L = \frac{1}{2}\rho v^2 S C_L$
Velocidad de descenso tipo autogiro	$v = \sqrt{\frac{2mg}{\rho S C_L}}$
Área circular barrida	$S = \pi r_e^2$
Área anular efectiva	$S = \pi(r_e^2 - r_i^2)$
Energía cinética	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$
Fuerza promedio de impacto	$F_{prom} \approx \frac{mv^2}{2d}$

14. Conclusiones

El descenso pasivo combina mecánica, aerodinámica y diseño estructural. La caída libre sin resistencia del aire permite estimar un caso extremo, pero los dispositivos reales pueden reducir considerablemente la velocidad mediante arrastre o sustentación.

Los sistemas tipo autogiro resultan especialmente interesantes porque pueden generar una fuerza vertical significativa sin propulsión activa. Su desempeño depende del área barrida por las palas, de la geometría del rotor, del ángulo de ataque y de la estabilidad de autorrotación. Sin embargo, una baja velocidad de descenso no garantiza por sí sola la supervivencia de una carga frágil: la energía restante debe disiparse mediante una estructura que aumente la distancia de frenado y distribuya las cargas.

El diseño más robusto no suele ser el más pesado ni el más grande, sino el que encuentra un compromiso adecuado entre masa, área aerodinámica, estabilidad y absorción de impacto.