



PRESENTACIÓN

Lanzadores de satélites ¿Qué son y cómo se controlan?

Andrés Marcos Esteban, Director del CSAT, MISE y ST3LLARsat

Departamento Ingeniería Aeroespacial

¿Qué son los Lanzadores de vehículos (LVs)?

Un LV es un cohete utilizado para enviar satélites / naves espaciales / personas al espacio o a otros planetas.

Centro Espacial de la Guyana (GSC)
https://centrespatialguyanais.cnes.fr/en/



CENTRE SPATIAL GUYANAIS
Port spatial de l'Europe
Europe's Spaceport
esa cnes



https://www.esa.int/es/articles/about-us/directorates/space-transportation/what-is-a-launcher

https://www.esa.int/articles/about-us/directorates/space-transportation/launcher-systems

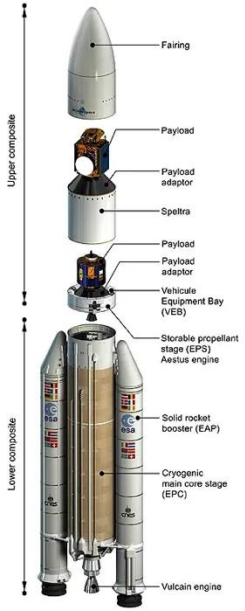


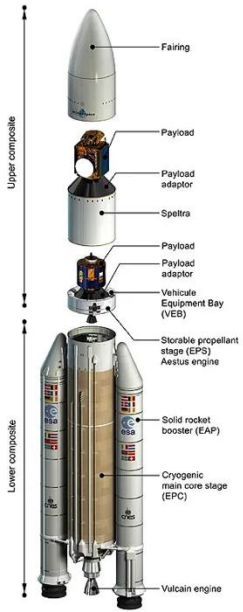


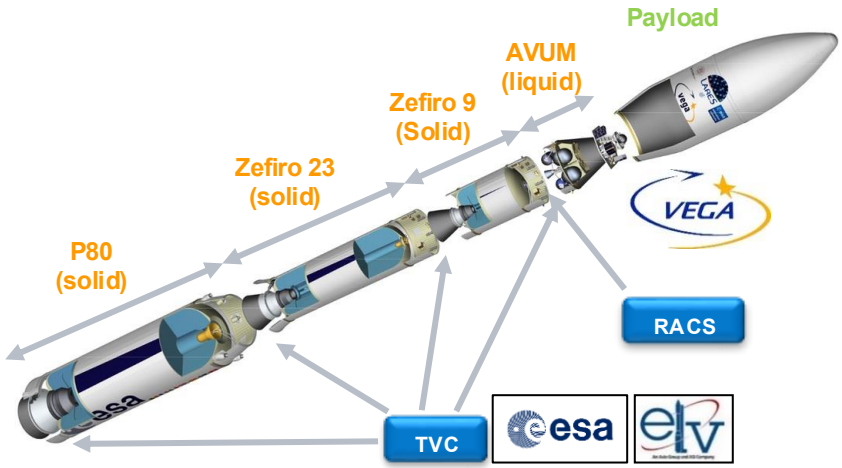
Image from **@Google Maps**



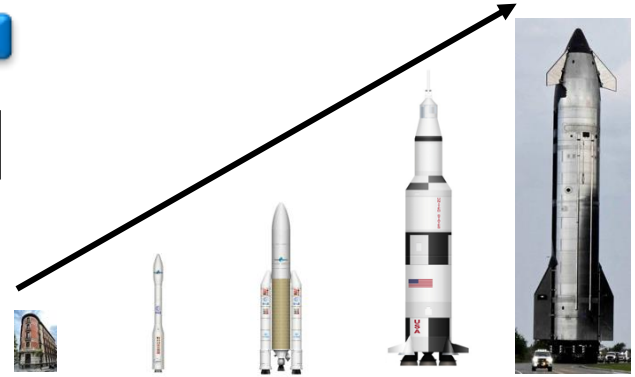
¿Cómo son los LVs?

Los LVs tienen varias etapas, cada una controlada por un sistema de control vectorizado de empuje (TVC)









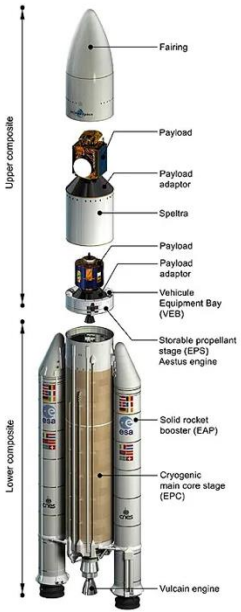
Edificio 5 plantas 15m | VEGA 30m/3m | Ariane-5 52m/5m | Saturn V 111m/10m | Starship 124m/10m

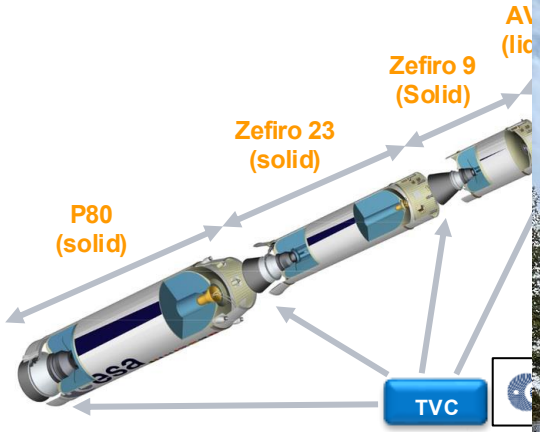


"Pirulí" de Madrid 232m/28-8m

¿Cómo son los LVs?

Los LVs tienen varias etapas, cada una controlada por un sistema de control vectorizado de empuje (TVC)









Edificio 5 plantas 15m



VEGA 30m/3m

Ariane-5 52m/5m



Saturn V 111m/10m

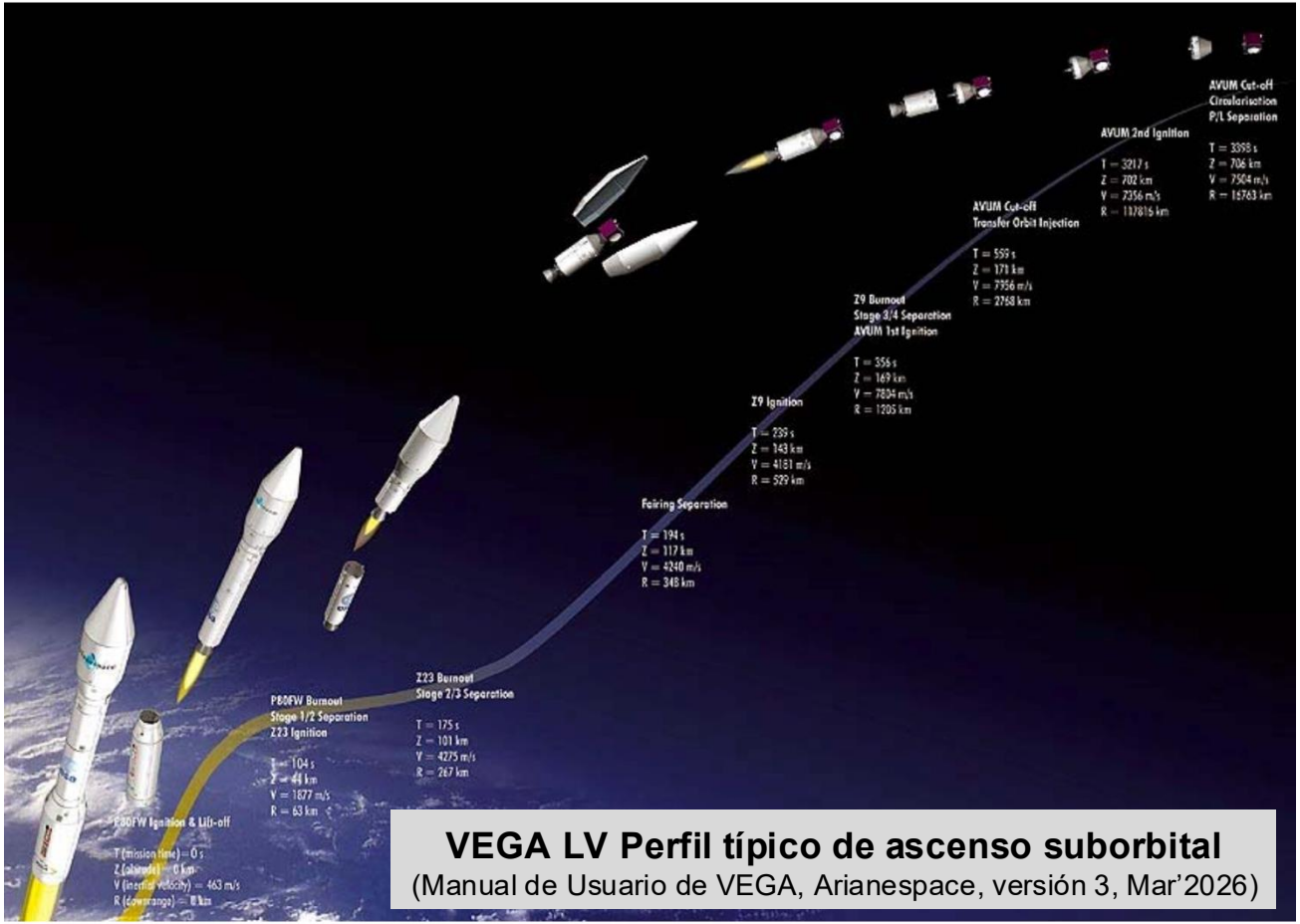


Starship 124m/10m



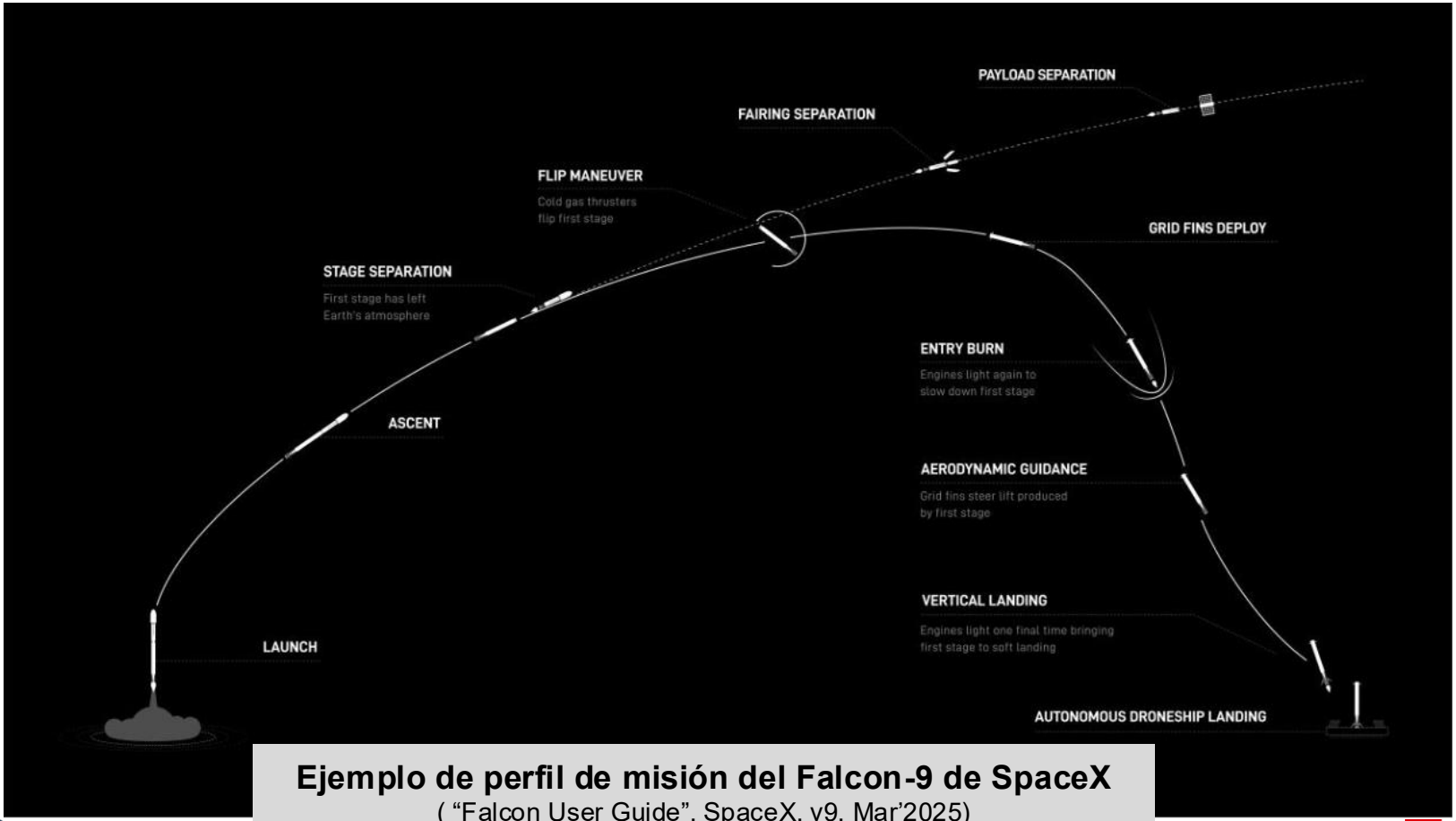
"Pirulí" de Madrid 232m/28-8m

Fases de vuelo de los LVs



VEGA LV Perfil típico de ascenso suborbital
(Manual de Usuario de VEGA, Arianespace, versión 3, Mar'2026)

Fases de vuelo de los Lanzadores Reutilizables (RLVs)

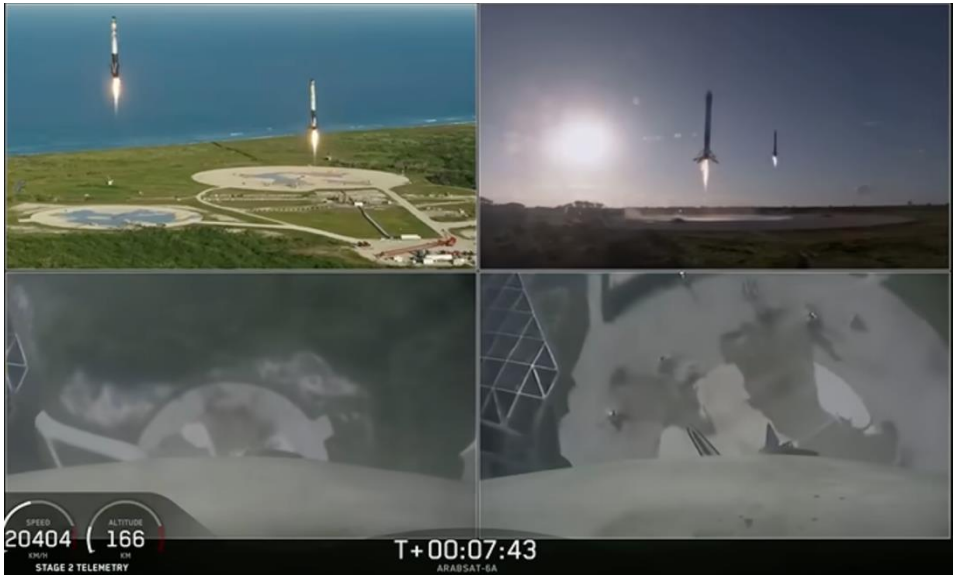


Ejemplo de perfil de misión del Falcon-9 de SpaceX
(“Falcon User Guide”, SpaceX, v9, Mar’2025)

Veamos algunos videos



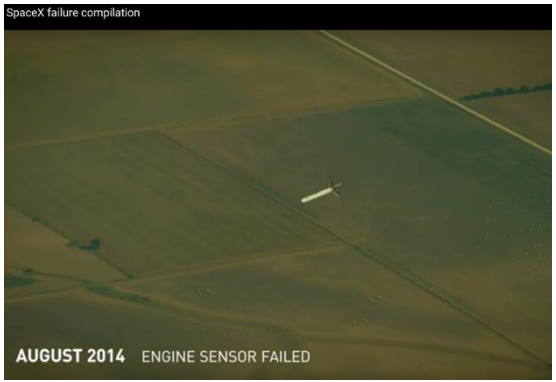
Lanzamiento VV05 del VEGA (2015)
https://www.youtube.com/watch?v=9oiwVtselrE



Space X – 1st Aterrizaje Vertical Mundial (2019)
https://www.youtube.com/watch?v=mY-fSnKTLqw

Parece fácil ... pero no lo es

Space X – Compilación de fallos https://www.youtube.com/watch?v=ambXDKFZhN8







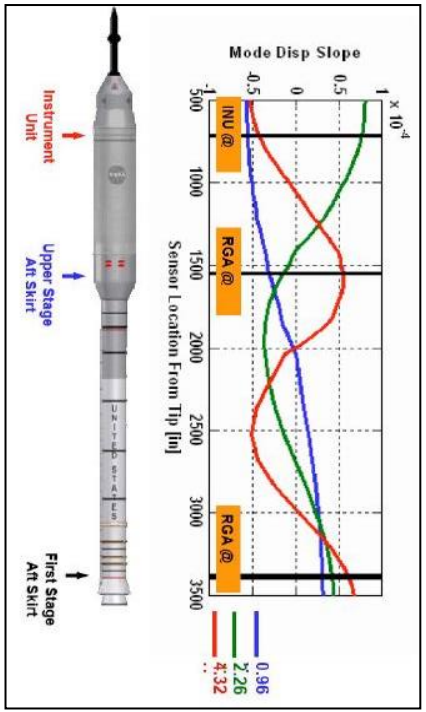




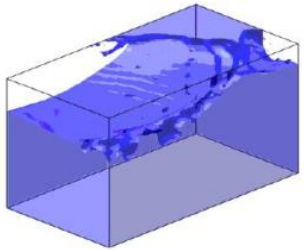
¿Por qué son tan difíciles de controlar? cosas internas

- **Vehículo:**
  - Inestable
  - Estructura flexible
  - Motores líquidos

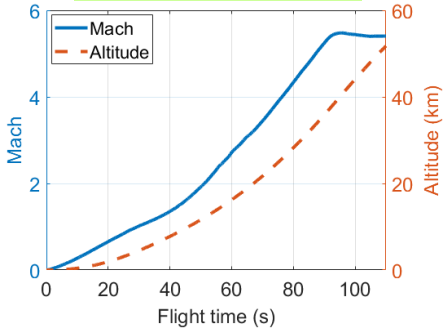
- **Alta variación de parámetros de vuelo**
- **Gran número y rango de incertidumbres**



Chapoteo



Misión VEGA V005





P80, 1st Etapa de VEGA: ¡¡ 88 Toneladas de combustible en 100s !!



Separación
T = 120 segundos

Despegue
T = 0 segundos

¿Por qué son tan difíciles de controlar? cosas externas

- **Entorno desafiante**:
  - Perturbaciones del Viento
  - Cargas estructurales(Qα)

40% de retrasos en los lanzamientos debido al clima

https://www.vaisala.com/en/expert-article/did-you-know-that-40-percent-of-space-launches-are-delayed-due-to-the-weather

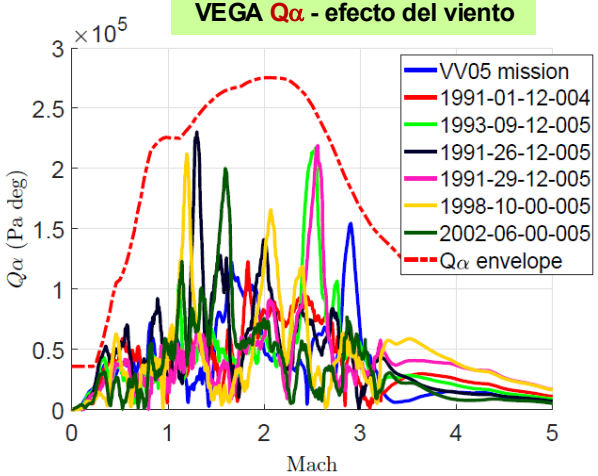
https://www.spacelaunchschedule.com/news/rocket-launch-delays-explained/

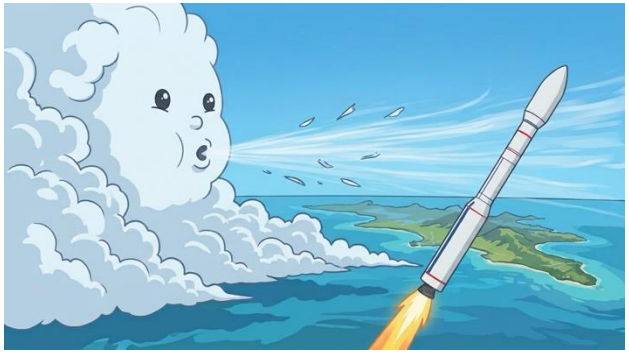
Qα es un parámetro muy importante.

Conecta la velocidad con el ángulo de ataque (piensa en una veleta de viento).

Indica la **posibilidad de romper el lanzador cuando su velocidad es alta y el viento es fuerte**

VEGA Qα - efecto del viento

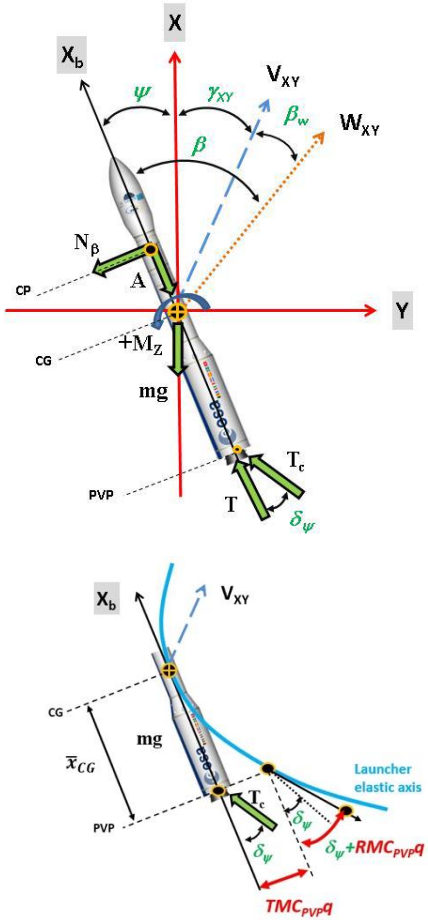






Imágenes creadas usando AI-Gemini con indicaciones del autor

¿Cómo hacemos los ingenieros para entender? lo difícil



Fuerzas y momentos rígidos y flexibles:

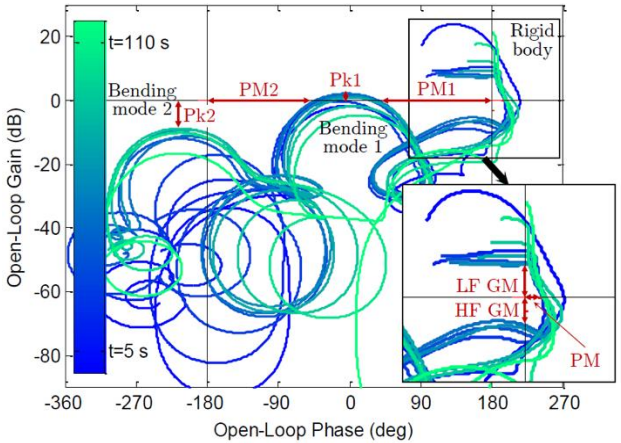
$$F_r = As_\psi - N_\beta c_\psi - Ts_\psi - T_c(c_{\delta_\psi}s_\psi + s_{\delta_\psi}c_\psi)$$
$$M_r = N_\beta(x_{CP} - x_{CG}) - T_c s_{\delta_\psi}(x_{CG} - x_{PVP})$$

$$F_f = T_c \sum_{i=1}^{k} RMC_{PVP_i}\, q_i$$
$$M_f = -T_c(\bar{x}_{CG} \sum_{i=1}^{k} RMC_{PVP_i} + \sum_{i=1}^{k} TMC_{PVP_i})\, q_i$$

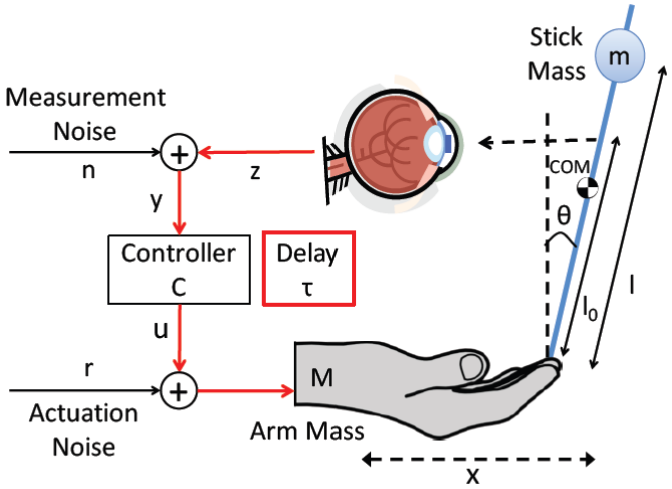
Complejas representaciones matemáticas de las ecuaciones de movimiento:

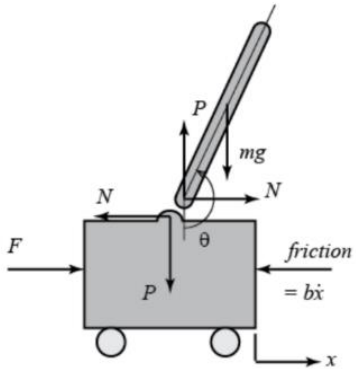
$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \ddot{z} \\ \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \\ \hline \dot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cccc:cc} 0 & 1 & 0 & 0 & \mathbf{0}_{1k} & \mathbf{0}_{1k} \\ 0 & a_1 & a_3 & a_2 & \mathbf{a}_{zq} & \mathbf{0}_{1k} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \mathbf{0}_{1k} & \mathbf{0}_{1k} \\ 0 & a_4 & a_6 & a_5 & \mathbf{a}_{\psi q} & \mathbf{0}_{1k} \\ \hline \mathbf{0}_{k1} & \mathbf{0}_{k1} & \mathbf{0}_{k1} & \mathbf{0}_{k1} & \mathbf{0}_{kk} & \mathbf{I}_k \\ \mathbf{0}_{k1} & \mathbf{0}_{k1} & \mathbf{0}_{k1} & \mathbf{0}_{k1} & \mathbf{a}_{qq} & \mathbf{a}_{q\dot{q}} \end{array}\right] \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ \psi \\ \dot{\psi} \\ \hline \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} + \left[\begin{array}{ccc} 0 & 0 & 0 \\ a_p & k_2 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 \\ k_1 & k_3 & -a_4 \\ \hline \mathbf{0}_{k1} & \mathbf{0}_{k1} & \mathbf{0}_{k1} \\ \mathbf{a}_{q\beta} & \mathbf{a}_{q\ddot{\beta}} & \mathbf{0}_{k1} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \beta_\psi \\ \ddot{\beta}_\psi \\ v_w \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q\alpha \\ \psi_{INS} \\ \dot{\psi}_{INS} \\ z_{INS} \\ \dot{z}_{INS} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cccc:cc} 0 & Q/V & Q & 0 & \mathbf{0}_{1k} & \mathbf{0}_{1k} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -\mathbf{a}_{\psi' q} & \mathbf{0}_{1k} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \mathbf{0}_{1k} & -\mathbf{a}_{\psi' q} \\ 1 & 0 & -l_{INS} & 0 & \mathbf{a}_{\psi q} & \mathbf{0}_{1k} \\ 0 & 1 & 0 & -l_{INS} & \mathbf{0}_{1k} & \mathbf{a}_{\psi q} \end{array}\right] \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ \psi \\ \dot{\psi} \\ \hline \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} + \left[\begin{array}{ccc} 0 & 0 & -Q/V \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{array}\right] \begin{bmatrix} \beta_\psi \\ \ddot{\beta}_\psi \\ v_w \end{bmatrix}$$



¿Cómo hacemos los ingenieros para entender? más fácil





Ecuaciones no lineales de movimiento del 'lanzador'

$$(M+m)\ddot{x} + ml(\ddot{\theta}\cos\theta - \dot{\theta}^2\sin\theta) = u + r$$

$$m(\ddot{x}\cos\theta + l\ddot{\theta} - g\sin\theta) = 0$$

$$z = x + l_0\sin\theta \qquad y = z + n$$

Péndulo invertido controlado por un carro

$$(M+m)\ddot{x} + b\dot{x} - ml\ddot{\phi} = u$$

$$(I+ml^2)\ddot{\phi} - mgl\phi = ml\ddot{x}$$





ACTIVIDAD

“Do-It-Yourself (DYI)”: Controla un “Lanzador”

Actividad DYI: Controla un “lanzador”

- **Usa un palo o regla de medir (equivalente a un lanzador durante el ascenso) para demostrar los conceptos matemáticos/de ingeniería de observabilidad y controlabilidad:**

  - **Toma dos palos de longitudes marcadamente distintas**
    (uno pequeño como un bolígrafo y otro largo como una regla de 1 metro)

  - **<u>Primero</u>: intenta equilibrar el más pequeño en tu mano**
    ➔ ¿Puedes hacerlo?

  - **<u>Segundo</u>: haz lo mismo con el más grande, pero…**
    - **2-a: mirando la base de la regla en tu mano**
    - **2-b: Mirando la parte superior de la regla**
      ➔ ¿Cuál es más fácil? ¿Por qué?