

# DESARROLLO DEL MÓDULO 1: EL SISTEMA DE IZAJE Y LA ESTRUCTURA

Referencia: API Spec 4F (Estructuras) / API RP 9B (Cables)

## 1. Fundamentos Mecánicos: El Sistema de Bloques

El sistema de izaje no es más que un multiplicador de fuerza a expensas de la velocidad y la distancia. El ingeniero mecánico debe ver el malacate (*drawworks*) no solo como un motor, sino como un gestor de energía cinética y potencial.

El **Malacate** convierte la potencia rotacional de los motores (AC o DC) en tracción lineal sobre la línea rápida (*fast line*). La transmisión de potencia debe superar no solo la carga del gancho, sino la inercia del sistema y la fricción de cada polea en el bloque corona y el bloque viajero.

## 2. Cálculo de Cargas (The Physics)

Aquí es donde la norma se encuentra con la física. Para un sistema de  $N$  líneas pasadas por el bloque viajero:

### A. Eficiencia del Sistema ( $\eta$ )

Asumir eficiencia del 100% es negligencia. Cada polea introduce pérdidas por flexión del cable y fricción en los rodamientos. Según manuales de ingeniería de perforación (y validado en campo), la eficiencia se calcula como:

$$\eta = \frac{K^N - 1}{K^S \cdot N \cdot (K - 1)}$$

Donde:

- $N$ : Número de líneas soportando la carga (string-up).
- $S$ : Número total de poleas en el sistema (Corona + Viajero).
- $K$ : Constante de fricción (típicamente 1.04 para rodamientos de rodillos, implicando un 4% de pérdida por polea).

### B. Carga Estática del Gancho ( $W_{hook}$ )

Es la suma vectorial de las fuerzas verticales:

$$W_{hook} = W_{block} + W_{string} + W_{overpull}$$

Nota:  $W_{string}$  debe considerar el factor de flotación si está sumergido en fluido.

### C. Carga en la Línea Rápida ( $F_{fast}$ ) - Cálculo Crítico

Esta es la tensión que el tambor del malacate debe vencer. Debido a la fricción acumulada, la línea rápida soporta más tensión que cualquier otra línea en el sistema.

$$F_{\text{fast}} = \frac{W_{\text{hook}}}{N} \times \eta$$

**Ojo de Ingeniero:** Si calculas el torque requerido en el malacate sin usar la eficiencia  $\eta$ , estarás subdimensionando la potencia requerida entre un 15% y un 20%.

## D. Carga en la Línea Muerta ( $F_{\text{dead}}$ )

Aunque teóricamente es  $W_{\text{hook}}/N$ , en la práctica el sensor del ancla (*deadline anchor*) lee la tensión estática. La carga crítica para el diseño del ancla y la subestructura considera la carga máxima de diseño.

## E. Carga Total en la Torre (Derrick Load)

Muchos ingenieros cometen el error de pensar que la torre solo soporta el peso del gancho.

**Incorrecto.** La torre soporta el gancho, más la tensión de la línea rápida tirando hacia el malacate, más la tensión de la línea muerta anclada a la subestructura.

$$F_{\text{derrick}} = W_{\text{hook}} + F_{\text{fast}} + F_{\text{dead}}$$

Sustituyendo:

$$F_{\text{derrick}} = W_{\text{hook}} \times \left( \frac{N+2}{N} \right) \quad (\text{Aprox. sin considerar } \eta)$$

Para cálculo exacto API 4F:

$$F_{\text{derrick}} = W_{\text{hook}} + \left( \frac{W_{\text{hook}}}{N} \times \eta \right) + \left( \frac{W_{\text{hook}}}{N} \right)$$

---

## 3. Normativa API 4F en Acción

La norma **API Spec 4F** rige el diseño y fabricación. Como ingenieros de mantenimiento o campo, debemos entender dos conceptos clave:

### A. Nivel de Especificación del Producto (PSL - Product Specification Level)

No todo el acero es igual.

- **PSL 1:** Requisitos estándar de materiales y soldadura.
- **PSL 2:** Obligatorio para condiciones severas (ej. offshore, ártico). Requiere trazabilidad total del acero y pruebas de impacto (Charpy V-Notch) para asegurar tenacidad a bajas temperaturas y evitar fractura frágil.

### B. Combinación de Cargas: Viento + Gancho

La capacidad de la torre (GNC - Gross Nominal Capacity) disminuye drásticamente con el viento. API 4F define dos escenarios límite que debes verificar en el *Load Chart* de la torre:

1. **Operating Condition (Condición Operativa):**

- Carga en gancho completa + Viento operativo (ej. 25 nudos).
  - *Riesgo:* El empuje lateral del viento crea un momento de vuelco que se suma a la carga de compresión en las patas de sotavento (leeward legs).
2. **Storm Condition (Condición de Tormenta):**
- Carga en gancho mínima (o nula, tubería en los peines/setback) + Viento máximo esperado (ej. 100 nudos).
  - *Riesgo:* Aquí el peligro es el **Setback**. Si tienes 20,000 pies de tubería estibada en la torre, eso eleva el centro de gravedad y actúa como una vela gigante. La combinación de viento alto + setback lleno es la causa #1 de colapso de torres.
- 

## 4. Inspección y Mantenimiento (API RP 4G)

La API RP 4G establece las categorías de inspección.

- **Categoría III:** Inspección visual exhaustiva cada 2 años.
- **Categoría IV:** Desarme, *sandblasting* y NDT (Ensayos No Destructivos) cada 10 años.

Como Ingeniero Senior, cuando llegas a una locación para una auditoría técnica o *rig acceptance*, no puedes mirarlo todo. Debes ir a los puntos de falla comunes.

### Lista de Chequeo del Ingeniero (El "Killer List")

| # | Componente                                       | Qué buscar (Criterio de Rechazo)  | Por qué es crítico  |
|---|--|---|---|
| 1 | <b>Pernos y Pasadores (Keepers) en la Corona</b> | Ausencia de pasadores de seguridad ( <i>cotter pins</i> ) o alambre de seguridad en tuercas.                  | Si un perno de la corona se suelta, cae 40 metros convirtiéndose en un proyectil letal ( <i>Dropped Object</i> ).           |
| 2 | <b>Poleas (Sheaves) API 8C</b>                   | Verificar el calibre de la garganta ( <i>Groove gauging</i> ). Si el radio es < radio del cable + tolerancia. | Una polea desgastada ( <i>corrugada</i> ) destruirá un cable nuevo en horas. El cable pellizcado pierde capacidad de carga. |

|   |   |  |  |
|---|---|--|--|
| 3 | <b>Patas de la Torre<br/>(Main Legs)</b>    | Abolladuras o deformaciones > 1/8" de profundidad o desviaciones de rectitud (bowing).               | Las patas trabajan a compresión pura. Una abolladura introduce pandeo local y reduce la capacidad de carga drásticamente según API 4F. |
| 4 | <b>Puntos de Soldadura en Subestructura</b> | Grietas en la unión de las vigas principales, especialmente cerca de la base del malacate y la mesa. | La vibración cíclica fatiga estas uniones. Una grieta aquí compromete la estabilidad de todo el equipo sobre el pozo.                  |
| 5 | <b>Alineación del Sistema de Izaje</b>      | Verificar que el centro de la corona alinee perfectamente con el centro del pozo (sin carga).        | Si hay excentricidad, el bloque viajero "baila" y golpea la torre. Además, genera desgaste lateral severo en las poleas.               |

Excelente decisión. Como ingenieros, sabemos que la teoría sin números es solo filosofía. Vamos a validar si este equipo soporta la operación o si estamos a punto de romper algo costoso (o peligroso).

A continuación, presento el **Caso de Estudio #1** para nuestra Guía Técnica.

---

## CASO DE ESTUDIO: Análisis de Cargas Críticas en Rig 2000 HP

### Escenario Operativo:

Estás en un Taladro de 2000 HP. La sarta de revestimiento (Casing) de 13-3/8" se ha pegado ligeramente. El *Company Man* te pide aplicar una tensión de **850,000 lbs** en el gancho para liberarla.

Debes determinar si es seguro proceder verificando la tensión en la línea rápida y el factor de seguridad del cable.

#### Datos de Entrada (Input Data):

1. **Carga en el Gancho (\$W\_{hook}\$):** \$850,000 \text{ lbs}\$.
2. **Sistema de Bloques (\$N\$):** 12 líneas (String-up).
3. **Tipo de Rodamientos:** Rodillos (Roller Bearings)  $\rightarrow$  Factor  $K = 1.04$  (según API 9B).
4. **Cable de Perforación:** Diámetro 1-1/2" (38.1 mm), Clasificación EIPS (Extra Improved Plow Steel), Núcleo de acero (IWRC).
5. **Resistencia a la Ruptura del Cable (\$LB\_{nom}\$):** \$228,000 \text{ lbs}\$ (Valor nominal de catálogo API 9A).

---

## PASO 1: Determinar la Eficiencia del Sistema ( $\eta$ )

No asumas el 100%. Con 12 líneas, tenemos múltiples poleas en la corona y el bloque viajero generando fricción.

Usamos la aproximación estándar para rodamientos de rodillos ( $K=1.04$ ):

$$\eta \approx \frac{1}{K^{\frac{1}{N-2}} + \text{fast/dead sheaves}}$$

*Nota práctica:* En lugar de resolver la serie geométrica compleja en el campo, los ingenieros usamos la **Tabla de Eficiencia API**.

Para **\$N=12\$ líneas** y rodamientos de rodillos:

$$\eta = 0.811 \quad (81.1\%)$$

**Interpretación:** Estamos perdiendo casi el **19%** de la potencia del malacate solo en fricción y flexión del cable antes de levantar un solo kilo.

---

## PASO 2: Cálculo de la Línea Rápida ( $F_{fast}$ )

Esta es la tensión real que siente el cable que entra al tambor del malacate.

$$F_{fast} = \frac{W_{hook}}{N \times \eta}$$

Sustituyendo:

$$F_{fast} = \frac{850,000 \text{ lbs}}{12 \times 0.811}$$

$$F_{fast} = 70,833 \text{ lbs}$$

$$\mathbf{F_{fast} = 70,833 \text{ lbs}}$$

**Análisis Comparativo:**

Si hubieras ignorado la fricción ( $\eta=1$ ), el cálculo hubiera sido  $850,000 / 12 = 70,833 \text{ lbs}$ .

*Diferencia:* Estarías subestimando la tensión en **16,500 lbs**. Ese error es suficiente para romper un cable fatigado.

---

## PASO 3: Verificación del Factor de Diseño (Safety Factor)

Según **API RP 9B**, el Factor de Diseño ( $\$FD\$$ ) mínimo para operaciones de perforación es típicamente **3.0**, y para bajada de revestidores (Casing) o *pulling on stuck pipe* se puede tolerar hasta **2.0** en situaciones controladas, aunque lo ideal es mantenerse arriba.

$$\begin{aligned} \$FD &= \frac{\text{Resistencia a la Ruptura} (\$LB_{\text{nom}})}{\text{Carga en Línea Rápida} (\$F_{\text{fast}})} \\ \$FD &= \frac{228,000 \text{ lbs}}{87,341 \text{ lbs}} \\ \$\mathbf{FD} &= 2.61 \end{aligned}$$

### Dictamen del Ingeniero Mecánico:

- **¿Es seguro?** Sí, pero con precaución.
- **Análisis:** El factor de 2.61 es aceptable para una maniobra temporal de *Overpull* (jalón de tubería pegada), ya que es superior a 2.0.
- **Restricción:** No se debe operar en este rango de forma continua (perforando), ya que aceleraría la fatiga del cable exponencialmente.

---

## PASO 4: Carga Total en la Torre (Derrick Load)

Como explicamos en la teoría, la torre no solo carga el gancho.

1. **Carga Gancho:** 850,000 lbs
2. **Carga Línea Rápida:** 87,341 lbs (Hacia el malacate)
3. **Carga Línea Muerta:** 70,833 lbs ( $\$W_{\text{hook}}/N\$$ , hacia el ancla)

$$\begin{aligned} \$F_{\text{derrick}} &= 850,000 + 87,341 + 70,833 \\ \$\mathbf{F}_{\text{derrick}} &\approx 1,008,174 \text{ lbs} \end{aligned}$$

### ¡Alerta Crítica!

Aunque el gancho marca 850k lbs, las patas de la torre están soportando **más de 1 millón de libras**. Si la capacidad nominal de la torre (GNC) fuera de 1,000,000 lbs, estaríamos **sobrecargando la estructura**, aun cuando el indicador de peso parezca estar dentro del límite.

---

## CONCLUSIÓN DEL EJERCICIO

Este cálculo demuestra por qué el Ingeniero Mecánico debe ir más allá de lo que dice el monitor del perforador.

1. La **fricción** aumenta la tensión en el cable del malacate en un 23% respecto al promedio ideal.
2. El **cable** de 1-1/2" EIPS está trabajando seguro (FD 2.61), pero cerca de su límite operativo.
3. La **estructura** está viendo cargas superiores a 1 millón de libras. Debes verificar la placa de la torre (API 4F Nameplate) inmediatamente para confirmar si la GNC es de 1.2M o 1.5M lbs. Si es de 1M lbs, **STOP WORK**. Excelente. Continuamos con la Parte 2 del Módulo 1.
- 4.
5. Si la Parte 1 fue sobre Estática (¿Aguanta el cable la carga máxima?), la Parte 2 es sobre Fatiga y Vida Útil (¿Cuántos ciclos aguanta el cable antes de fallar?).
- 6.
7. Para un Ingeniero Mecánico, el cable de perforación (Wire Rope) no es una cuerda; es una máquina compleja compuesta por cientos de partes móviles (alambres) que interactúan entre sí bajo tensión, flexión y abrasión.

---

## MÓDULO 1, PARTE 2: Fatiga del Cable y el Concepto "Ton-Milla" (Ton-Mile)

Referencia: API RP 9B (Application, Care, and Use of Wire Rope for Oil Field Service).

### 1. El Concepto Físico: Trabajo Mecánico Acumulado

El cable de perforación falla raramente por sobrecarga (tensión pura). Falla por **fatiga por flexión**. Cada vez que el cable pasa por una polea (corona o viajero) y se enrolla en el tambor, los alambres individuales sufren ciclos de tensión-compresión y fricción interna.

En Ingeniería de Perforación, cuantificamos este desgaste mediante la unidad de trabajo **Ton-Milla (TM)**.

Físicamente, 1 Ton-Milla equivale a levantar una tonelada a una distancia de una milla.

$$\$\$Work = F \times d\$$$

Sin embargo, el cálculo no es lineal porque la carga ( $F$ ) varía constantemente a medida que sacamos o metemos tubería del pozo (el peso de la sarta disminuye al sacarla).

---

### 2. La Ecuación Maestra (API RP 9B)

Para calcular el trabajo realizado durante un "Viaje Redondo" (sacar toda la sarta y volver a meterla), utilizamos la integral aproximada definida por API.

#### Fórmula para Viaje Redondo (Round Trip):

$$\text{TR}_{\text{RT}} = \frac{D \cdot (L_s + D) \cdot W_m}{10,560,000} + \frac{D \cdot (M + 0.5C)}{2,640,000}$$

Donde:

- $\text{TR}_{\text{RT}}$ : Trabajo realizado en Ton-Millas (Round Trip).
- $D$ : Profundidad del hoyo (pies).
- $L_s$ : Longitud de una parada/tiro (*stand*) de tubería (aprox. 93 pies).
- $W_m$ : Peso unitario de la tubería de perforación en el lodo (lbs/pie). **¡Crítico! Incluye flotación.**
- $M$ : Peso del Bloque Viajero + Top Drive + Gancho (lbs).
- $C$ : Peso efectivo del BHA (Drill Collars) menos el peso de la tubería que reemplazan (lbs).
  - $C = (W_{\text{BHA}\text{\_air}} - W_{\text{DP}\text{\_air}}) \times \text{Length}_{\text{BHA}} \times BF$
- **Constantes:**
  - \$10,560,000\$: Factor de conversión (\$5280 ft/mile) × 2000 lbs/ton\$).
  - El denominador varía porque el trabajo de subir es positivo y bajar "devuelve" energía al sistema, pero para efectos de **fatiga**, el daño es acumulativo en ambas direcciones.

---

### 3. Estrategia de Mantenimiento: Corte y Deslizamiento (Cut and Slip)

El desgaste no es uniforme a lo largo de los 5,000 pies de cable en el carrete. Se concentra en dos **Puntos Críticos de Fatiga**:

1. **Punto de Cruce (Crossover Point):** Donde el cable cambia de capa en el tambor del malacate. Aquí sufre "aplastamiento" severo.
2. **Punto de Recogida (Pickup Point):** El segmento de cable que está encima de la polea de la corona justo cuando el bloque viajero está en su punto más bajo (levantando la carga máxima al iniciar el viaje de salida).

#### El Procedimiento Ingenieril

Para evitar la falla en estos puntos localizados, implementamos un programa de **Deslizamiento (Slip) y Corte (Cut)**.

- **Deslizar:** Soltar cable del ancla para mover los puntos de fatiga a una zona de menor estrés.

- **Cortar:** Eliminar la sección de cable que ha acumulado demasiadas Ton-Millas y que ahora está en el extremo del tambor.

**Meta:** Mantener un factor de servicio constante. Por ejemplo, para un cable de 1-1/2", podríamos cortar **120 pies cada 1,800 Ton-Millas acumuladas.**

---

## 4. CASO DE ESTUDIO #2: Cálculo de Ton-Millas y Decisión de Corte

### Escenario:

Estás perforando la sección intermedia a 12,000 pies. Acabas de terminar un viaje completo para cambiar la mecha. El Perforador te pregunta si debe realizar un corte de cable antes de volver a perforar.

### Datos Técnicos:

1. **Profundidad (\$D\$):** 12,000 ft.
2. **Lodo:** Base Aceite, densidad 10 ppg (libras por galón).
3. **Tubería (DP):** 5", 19.50 lbs/ft (nominal air weight).
4. **BHA:** Peso en aire = 80,000 lbs. Longitud irrelevante para el cálculo simplificado de \$M\$, pero asumiremos peso concentrado.
5. **Bloque Viajero (\$M\$):** 45,000 lbs (Top Drive incluido).
6. **Historial Cable:** Acumulado actual antes de este viaje = 1,400 TM.
7. **Meta de Corte (Goal):** 1,800 TM.

### PASO A: Factor de Flotación (\$BF\$)

Principio de Arquímedes. El acero pesa menos sumergido.

$$\$BF = 1 - \frac{\text{Densidad Lodo (ppg)}}{65.5}$$

$$\$BF = 1 - \frac{10}{65.5} = 0.847$$

### PASO B: Pesos Sumergidos (\$W\_m\$ y \$C\$)

- **Peso tubería en lodo (\$W\_m\$):**  

$$\$W_m \approx 21 \text{ lbs/ft (adjusted)} \times 0.847 \approx 17.8 \text{ lbs/ft}$$

(Nota: Usamos peso ajustado aprox. por uniones, asumimos 19.5 nominal para ejercicio simple).

$$\$W_m = 19.5 \times 0.847 = 16.5 \text{ lbs/ft}$$
- **Exceso de peso BHA (\$C\$):**  
 Simplificación API: Consideramos el peso del BHA en exceso sobre la tubería.  

$$\$W_{BHA\_mud} = 80,000 \times 0.847 = 67,760 \text{ lbs}$$

$$\$W_{DP\_equivalent} = 12,000 \text{ ft} \times 16.5 \text{ lbs/ft} = 198,000 \text{ lbs}$$

(Para la fórmula simplificada, usaremos el peso efectivo del BHA sumado al M).

## PASO C: Cálculo de Trabajo (\$TR\_{RT}\$)

Usaremos la aproximación simplificada API para viajes profundos:

$$\$TR_{RT} \approx \frac{D \cdot (W_{string} + M)}{5,280,000}$$

Donde \$W\_{string}\$ es el peso total de la sarta en flotación.

$$\$W_{string} = (11,000 \text{ ft} \times 16.5) + 67,760 = 181,500 + 67,760 = 249,260 \text{ lbs}$$

$$\$TR_{RT} = \frac{12,000 \cdot (249,260 + 45,000)}{5,280,000 \cdot 2} \quad (\text{Factor 2 por ida y vuelta})$$

Corrección de fórmula rápida: Usemos la detallada para precisión.

### Término 1 (Trabajo de la tubería):

$$\$T_1 = \frac{12,000 \times (90 + 12,000) \times 16.5}{10,560,000} \approx \frac{144,000,000}{10.56M} \approx 225 \text{ TM}$$

### Término 2 (Trabajo del Bloque y BHA):

$$\$T_2 = \frac{12,000 \times (45,000 + 0.5(67,760 - \text{correction}))}{2,640,000}$$

Asumamos simplificado: \$4 \times D \times (M + 0.5 \times \text{exceso BHA})\$.

$$\$T_2 \approx \frac{12,000 \times 60,000}{2,640,000} \approx 272 \text{ TM}$$

### Total del Viaje:

$$\$TR_{RT} \approx 225 + 272 = \mathbf{497 \text{ TM}}$$

## PASO D: Decisión Ingenieril

1. **Acumulado Previo:** 1,400 TM.
2. **Trabajo Realizado:** 497 TM.
3. **Total Actual:** \$1,400 + 497 = \mathbf{1,897 \text{ TM}}\$.
4. **Límite de Corte:** 1,800 TM.

### Dictamen:

El cable ha excedido su límite de diseño de corte por **97 TM**.

**ACCIÓN INMEDIATA:** Debes ordenar un "Slip and Cut" (Deslizar y Cortar) **antes** de volver a meter la mecha en el hoyo. Si ignoras esto, el segmento de cable fatigado volverá a entrar en el sistema de poleas bajo carga, aumentando el riesgo de rotura de alambres internos.

---

## 5. Criterios de Retiro (API 9B - Visual Inspection)

Además del cálculo, el ojo del ingeniero manda. Si ves esto, rechaza el cable inmediatamente:

- Roturas en el Valle (Valley Breaks):** Si ves un alambre roto justo en el punto de contacto entre dos torones (*strands*). **Peligro inminente.** Indica fatiga interna.
- Roturas en la Corona (Crown Breaks):** Alambres rotos en la parte exterior. API permite un cierto número (ej. 3 roturas por paso de cable), pero si están agrupadas, se corta.
- Reducción de Diámetro:** Si el diámetro del cable se reduce más del 5% del nominal (ej. de 1.50" baja a 1.42"), significa que el núcleo (IWRC) ha colapsado. El cable está "muerto".

## MÓDULO 1, PARTE 3: Potencia al Freno (BHP) y Curvas de Desempeño

Referencia: API Spec 7K (Drilling Equipment) / API RP 7L (Inspection/Maintenance).

### 1. La Física del Malacate (The Drawworks Physics)

El malacate no es más que un gestor de energía.

- Levantando (Hoisting):** Convierte energía eléctrica/mecánica en Energía Potencial Gravitatoria ( $E_p = mgh$ ).
- Bajando (Lowering):** Disipa Energía Potencial en forma de Calor (Frenado).

#### A. Cálculo de Potencia Requerida (Input Horsepower)

Para diseñar o seleccionar un malacate, no usamos la potencia nominal del motor (ej. 2000 HP), sino la potencia requerida en el gancho considerando las pérdidas.

La ecuación fundamental de potencia para izaje es:

$$HP_{\text{input}} = \frac{W_{\text{hook}} \times V_{\text{hook}}}{33,000} \times \eta_{\text{mech}} \times \eta_{\text{block}}$$

Donde:

- $W_{\text{hook}}$ : Carga en el gancho (lbs).
- $V_{\text{hook}}$ : Velocidad de izaje del bloque viajero (ft/min).
- \$33,000\$: Factor de conversión (\$1 HP = 33,000 ft-lbs/min).
- $\eta_{\text{mech}}$ : Eficiencia mecánica interna del malacate (Cadenas, engranajes). Típicamente **0.85 - 0.90** para transmisiones de cadena modernas.
- $\eta_{\text{block}}$ : Eficiencia del sistema de bloques (calculada en la Parte 1, aprox **0.81** para 12 líneas).

**Ingeniería Aplicada:** La eficiencia total del sistema ( $\eta_{total} = \eta_{mech} \times \eta_{block}$ ) suele rondar el **65% al 72%**. Esto significa que un malacate de 2000 HP solo entrega unos **1,400 HP efectivos** al gancho.

## B. Curvas de Desempeño (Performance Curves)

El malacate no entrega torque constante. Depende de:

1. **La marcha (Gear Ratio):** Baja (Low-Low) para cargas pesadas, Alta (High-High) para viajes rápidos con bloque vacío.
2. **El enrollado del tambor (Drum Layer):** A medida que el cable se enrolls (capa 1, 2, 3...), el diámetro efectivo del tambor aumenta.
  - **Efecto Mecánico:** Al aumentar el diámetro ( $D$ ), el Torque ( $T = F \times r$ ) requerido aumenta para la misma carga, pero la velocidad de línea aumenta.
  - **Consecuencia:** La capacidad de levantamiento *disminuye* en las últimas capas del tambor.

### Gráfica Crítica:

Todo ingeniero debe tener en la caseta del perforador la curva "**Hook Load vs. Hoisting Speed**".

- *Eje X:* Velocidad (ft/min).
- *Eje Y:* Carga (lbs).
- *Curva:* Es una hipérbola rectangular ( $P = F \cdot v = \text{constante}$ ). No intentes levantar 500k lbs en 3ra marcha; quemarás los embragues o dispararás los motores por sobrecorriente.

## C. Disipación de Energía: El Freno Auxiliar

Al bajar tubería, convertimos  $E_p$  en  $E_k$ . Un freno de fricción (bandas/discos) no puede disipar ese calor continuamente sin cristalizarse.

- **Freno Eddy Current (Elmagco):** Induce corrientes parásitas en un rotor dentro de un campo magnético. La energía se disipa como calor en el agua de refrigeración.
- **Hidromático:** Usa resistencia de fluido (agua).
- **Cálculo de Calor:**  
$$HP_{heat} = \frac{W_{hook} \times V_{lower}}{33,000}$$
*Dato:* El sistema de refrigeración debe ser capaz de evacuar estos BTU, o el freno fallará y la carga caerá (Runaway block).

---

# MÓDULO 1, PARTE 4: Top Drive vs. Mesa Rotaria

Referencia: API Spec 8C (Hoisting and Drilling Equipment) vs. API Spec 7K.

Aquí entramos en la dinámica rotacional. La industria ha migrado masivamente al Top Drive (TDS), pero entender la Mesa Rotaria (Rotary Table) es vital para conceptos de torque.

## 1. Comparativa Mecánica y Estructural

| Característica          | Mesa Rotaria (Kelley Drive)   | Top Drive (TDS)  |
|-------------------------|---|--|
| Transmisión de Torque   | A través del <i>Kelly Bushing</i> en el piso de perforación.                      | Directo desde motores AC/DC suspendidos en el bloque.  |
| Longitud de Perforación | Limitada al largo del Kelly (30-40 pies). Hay que hacer conexión cada tubo.       | Permite perforar por paradas ( <i>Stands</i> ) de 90 pies (3 tubos). Ahorra 2/3 de las conexiones. |
| Riesgo Operativo        | No puede rotar ni circular mientras se viaja (saca tubería). Alto riesgo de pega. | Permite <b>Back-Reaming</b> (rotar y circular al salir). Crítico en pozos desviados.               |

## 2. Torque Reactivo (Reactive Torque): El Dolor de Cabeza Estructural

Tercera Ley de Newton: Si aplicas 30,000 ft-lbs de torque a la tubería para hacerla girar a la derecha, el equipo quiere girar 30,000 ft-lbs a la izquierda.

- **En Mesa Rotaria:** El torque reactivo se transfiere a las vigas del piso de la subestructura. Es robusto y simple.
- **En Top Drive:** El TDS cuelga del gancho. Si no lo sujetas, girará loco y destrozará las líneas hidráulicas/eléctricas (Service Loops).

- **Solución Mecánica:** El **Torque Track** (Riel Guía). Un sistema de rieles a lo largo de la torre que absorbe el momento torsor y lo transmite a la estructura de la torre.
- **Punto de Inspección:** Como ingeniero, revisa los rodillos (*dollies*) del Top Drive. Si el riel está desalineado, el torque reactivo destruirá los rodillos y el TDS se atascará a media torre.

### 3. Dinámica de Vibraciones: Stick-Slip

La sarta de perforación no es rígida; es un resorte torsional de 10,000 pies de largo.

#### El Fenómeno (The Physics of Stick-Slip)

1. **Stick (Pegar):** La mecha se frena por fricción con la roca (RPM = 0).
2. **Wind-up (Enrollado):** El Top Drive sigue girando en superficie, acumulando energía potencial elástica en la tubería ( $\tau = k \dot{\theta}$ ).
3. **Slip (Deslizar):** El torque acumulado vence la fricción estática. La mecha se libera y gira violentamente (hasta 3x las RPM de superficie).
  - **Consecuencia:** Destrucción de los cortadores de la mecha (PDC), fatiga de conexiones y posible desenrosque (*twist-off*).

#### Solución Ingenieril: Sistemas "Soft Torque"

No es mecánico, es control electrónico.

El VFD (Variador de Frecuencia) del Top Drive se programa para actuar como un amortiguador.

- Cuando detecta que el torque sube (fase Stick), reduce las RPM ligeramente para no sobrecargar el resorte.
- Cuando el torque baja (fase Slip), acelera para absorber la energía de rebote.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS - MÓDULO 1: SISTEMAS DE SUPERFICIE

### 1. Estándares API (American Petroleum Institute)

Estos documentos son ley en la industria. Definen cómo se diseñan y fabrican los equipos.

- **API Spec 4F – Specification for Drilling and Well Servicing Structures.**
  - **Uso en el Módulo:** Clasificación PSL (1 y 2), combinaciones de carga (Viento + Gancho), y criterios de diseño para torres y subestructuras.
- **API Spec 8C – Drilling and Production Hoisting Equipment (PSL 1 and PSL 2).**
  - **Uso en el Módulo:** Especificaciones para el Bloque Viajero, Gancho, Elevadores y la ruta de carga del Top Drive. Define los criterios de diseño de las poleas.

- API Spec 7K – *Drilling and Well Servicing Equipment*.
  - Uso en el Módulo: Especificaciones para el Malacate (Drawworks), Mesa Rotaria y Mangueras de Lodo.
- API Spec 9A – *Specification for Wire Rope*.
  - Uso en el Módulo: Propiedades físicas del cable de acero (grados de acero, tipos de núcleo, resistencia nominal a la ruptura).

## 2. Prácticas Recomendadas API (Recommended Practices - RP)

Estos documentos definen cómo se usan, inspeccionan y mantienen los equipos en operación.

- API RP 4G – *Operation, Inspection, Maintenance, and Repair of Drilling and Well Servicing Structures*.
  - Uso en el Módulo: Definición de las Categorías de Inspección (III y IV), listas de chequeo visual y criterios de rechazo para miembros estructurales (abolladuras, corrosión).
- API RP 9B – *Application, Care, and Use of Wire Rope for Oil Field Service*.
  - Uso en el Módulo: Documento Crítico. Contiene la metodología oficial para el cálculo de Ton-Millas (Trabajo), factores de diseño (seguridad), programas de corte y deslizamiento (*Slip and Cut*), y criterios visuales de retiro de cable.
- API RP 7L – *Inspection, Maintenance, Repair, and Remanufacture of Drilling Equipment*.
  - Uso en el Módulo: Mantenimiento de malacates y equipos rotatorios.

## 3. Literatura Técnica de Soporte

- IADC Drilling Manual (International Association of Drilling Contractors):
    - Referencia general para fórmulas de campo simplificadas (Potencia al Freno, Hidráulica básica).
  - Manuales de Fabricante (OEM - Original Equipment Manufacturer):
    - National Oilwell Varco (NOV), Canrig, Tesco (para curvas específicas de desempeño de Top Drives y Malacates).
-