Curso de Capacitación

REDSUMA



Manejo Defensivo de Vehículos 4x4 en Alta Montaña y Faenas Mineras

Módulo 2:

Mecánica Avanzada y Física del Vehículo 4x4.

---

redsuma.cl

Introducción: La Ingeniería Detrás de la Tracción en Entornos Críticos

La conducción en alta montaña y en faenas mineras no es una actividad que dependa meramente de la intuición o la habilidad motriz básica; es un ejercicio constante de física aplicada. Cuando un vehículo de dos toneladas y media, cargado con equipos y personal, se enfrenta a una pendiente del 18% sobre una superficie de ripio suelto a 4.000 metros sobre el nivel del mar, las leyes de la termodinámica, la fricción y la mecánica clásica dictan el éxito o el fracaso de la maniobra. Este módulo tiene como objetivo desmitificar la "caja negra" que representa la camioneta 4x4 moderna, transformando al conductor en un operador técnico capaz de visualizar el flujo de energía desde la cámara de combustión hasta la interfaz neumático-suelo.

En la industria minera, el vehículo liviano (camioneta 4x4) es una herramienta de producción crítica. Su operación segura depende de comprender no solo *cómo* accionar una perilla o palanca, sino *por qué* se debe hacer. ¿Por qué la caja reductora multiplica la fuerza pero reduce la velocidad? ¿Por qué un diferencial abierto puede dejar inmóvil a un vehículo con 200 caballos de fuerza? ¿Cómo interactúa la presión de inflado con la resistencia al corte de una capa de nieve? Al responder estas preguntas desde una perspectiva de ingeniería mecánica, eliminamos la improvisación y establecemos protocolos basados en la certeza técnica.

Este reporte exhaustivo desglosará los subsistemas vitales del vehículo: la arquitectura de la transmisión, la física de la caja de transferencia, la gestión de par a través de los diferenciales y la ciencia de los neumáticos. Cada sección profundizará en los principios operativos, las limitaciones físicas y las aplicaciones prácticas en el contexto de la alta montaña, proporcionando el fundamento teórico necesario para el "Manejo Defensivo de Alta Montaña".

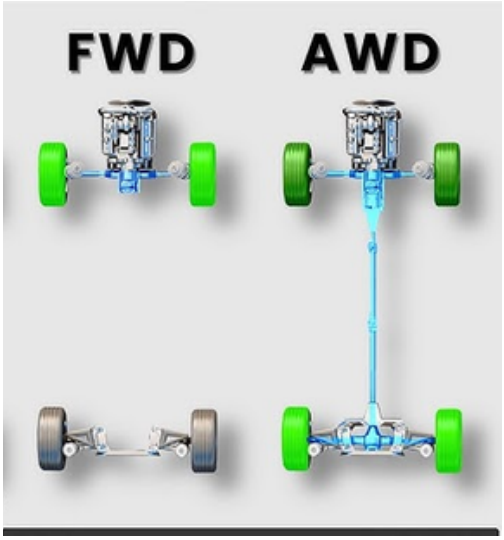


1. Sistemas de Tracción: Arquitectura, Física y Diferenciación Técnica

La tracción, en términos físicos, es la fuerza de fricción estática generada entre el neumático y la superficie que permite la propulsión del vehículo. Sin embargo, la manera en que el par motor (*torque*) llega a las ruedas varía radicalmente según la arquitectura del vehículo. En el mercado actual, y en las flotas mineras, conviven tecnologías que a menudo se confunden bajo el término genérico "4x4", pero cuyas diferencias mecánicas son críticas para la seguridad operativa: el AWD (*All-Wheel Drive*) y el 4WD (*Four-Wheel Drive*).

1.1 Análisis Comparativo Profundo: AWD vs. 4WD (Part-Time)

Para un operador de maquinaria o vehículo minero, distinguir entre estos sistemas no es una cuestión semántica, sino de supervivencia mecánica y operativa. La diferencia radica en la gestión de la velocidad angular entre ejes.



1.1.1 All-Wheel Drive (AWD): La Física de la Tracción Permanente

El sistema AWD está diseñado para la conducción en carreteras pavimentadas y condiciones meteorológicas variables (lluvia, nieve ligera). Su característica mecánica definitoria es la presencia de un Diferencial Central o un acoplamiento viscoso entre el eje delantero y el trasero.

- El Principio del Diferencial Central:

Cuando un vehículo toma una curva, las cuatro ruedas trazan arcos de diferente radio. Las ruedas delanteras recorren una distancia mayor que las traseras. Por lo tanto, el eje delantero debe girar a una velocidad angular $\Omega_{delantero}$ mayor que el eje trasero $\Omega_{trasero}$

$$\Omega_{delantero} > \Omega_{trasero}$$

Si no existiera un mecanismo que permitiera esta diferencia, se generaría una tensión torsional en el eje de transmisión (*driveshaft*), conocida como *wind-up*. El sistema AWD utiliza un diferencial central (mecánico tipo Torsen, o paquetes de embrague controlados electrónicamente) para permitir esta diferenciación de velocidad de manera constante. Esto permite que el vehículo tenga tracción en las cuatro ruedas sobre asfalto seco sin dañar la transmisión ni arrastrar los neumáticos.

- Limitaciones en Minería:

Aunque el AWD ofrece excelente seguridad pasiva en carretera, presenta una desventaja crítica en terrenos extremos (off-road severo). Al tener un diferencial central abierto o de deslizamiento limitado, el sistema busca el equilibrio. Si un eje pierde tracción completamente (ej. eje delantero en el aire al coronar una cima), el diferencial central podría derivar toda la energía a ese eje sin resistencia, dejando al eje con tracción (trasero) sin fuerza. Los sistemas AWD modernos mitigan esto con electrónica, pero carecen de la conexión mecánica sólida necesaria para el torque extremo requerido en faena.

1.1.2 Four-Wheel Drive (4WD Part-Time): La Herramienta de Trabajo

El sistema 4WD *Part-Time*, estándar en camionetas mineras (Toyota Hilux, Ford Ranger, Mitsubishi L200), se caracteriza por la **ausencia de un diferencial central**. En su lugar, utiliza una **Caja de Transferencia** (*Transfer Case*) que bloquea solidariamente ambos ejes.

- Mecánica del Bloqueo entre Ejes:

Al activar el 4x4 (modos 4H o 4L), la caja de transferencia conecta mecánicamente el eje de salida delantero con el trasero mediante una cadena de alta resistencia o engranajes. Esto obliga a que la velocidad angular del eje delantero sea idéntica a la del trasero:

$$\Omega_{delantero} = \Omega_{trasero}$$

- El Fenómeno del "Wind-Up" (Estrés de Transmisión):

Esta igualdad obligatoria de velocidades es la razón por la cual nunca se debe usar 4WD en pavimento seco. Al girar en una superficie con alto coeficiente de fricción ($\mu \approx 0.8 - 1.0$), las ruedas no pueden deslizarse para compensar la diferencia de distancia recorrida en la curva. Esto genera una fuerza torsional inmensa que se acumula en la caja de transferencia, los cardanes y los diferenciales. Si esta energía no se libera (mediante el deslizamiento de una rueda en tierra o grava), puede provocar la fractura catastrófica de componentes metálicos (rotura de crucetas, cadenas de transferencia o palieres).

- Ventaja Operativa:

En barro, nieve profunda o pendientes de material suelto, este bloqueo es una ventaja absoluta. Garantiza que, independientemente de si el eje delantero patina, el eje trasero recibirá el 50% del par motor de manera ininterrumpida, asegurando la propulsión donde un sistema AWD podría dudar o sobrecalentar sus embragues.

1.2 Modos de Transferencia: 2H, 4H y 4L

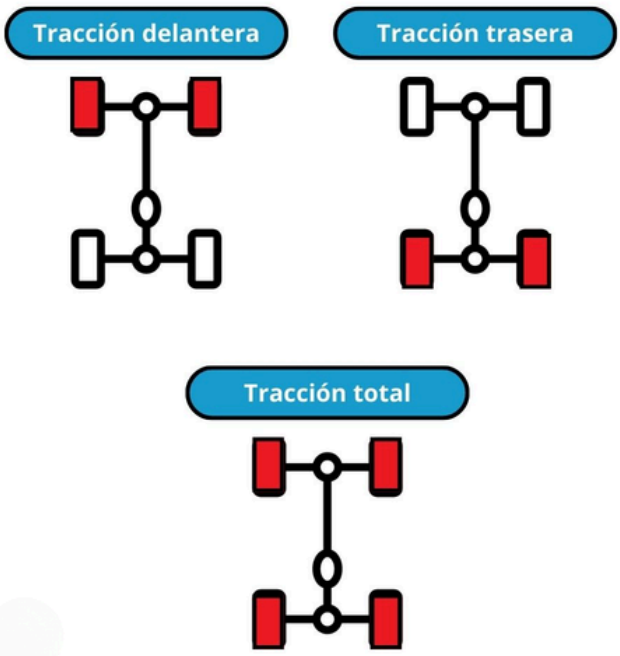
La correcta selección de los modos de la caja de transferencia es la primera decisión técnica que toma el conductor al abandonar el asfalto.

1.2.1 2H (Two-Wheel Drive High) - Tracción Simple

- **Flujo de Energía:** El motor impulsa la transmisión, y esta envía el par exclusivamente al diferencial trasero. El eje delantero gira libremente (desconectado en la transferencia y, a menudo, en los cubos de rueda).
- **Física:** Menor masa rotacional inercial y menor fricción mecánica.
- **Uso:** Desplazamientos en pavimento seco, autopistas y caminos de tierra compactada y plana dentro de la mina. Es el modo de máxima eficiencia de combustible y menor desgaste mecánico.

1.2.2 4H (Four-Wheel Drive High) - Tracción Total Alta

- **Flujo de Energía:** La caja de transferencia acopla el eje delantero. La relación de transmisión es 1:1 (sin reducción). El par se divide 50/50 entre ejes (en condiciones ideales de tracción).
- **Física:** Aumenta la superficie total de tracción disponible. Si $F_{tracción} = \mu \times N$ (donde N es la fuerza normal o peso sobre la rueda), al distribuir la fuerza motriz entre cuatro puntos de contacto en lugar de dos, se reduce la fuerza tangencial requerida por cada neumático individualmente para mover el vehículo, reduciendo la probabilidad de superar el límite de fricción estática y patinar.
- **Uso:** Caminos de tierra, ripio (gravilla), nieve ligera, lluvia torrencial (con precaución), y calamina. Velocidades típicas hasta 80-100 km/h, siempre que la superficie permita cierto deslizamiento.



1.2.3 4L (Four-Wheel Drive Low) - La Caja Reductora

- **Flujo de Energía:** La potencia pasa a través de un juego de engranajes planetarios reductores dentro de la caja de transferencia antes de salir a los ejes.
- **Física:** Intercambio de velocidad por fuerza (par). Analizaremos esto en profundidad en la siguiente sección.
- **Uso:** Situaciones de alta demanda de torque (pendientes fuertes) o necesidad de control de velocidad extremo (descensos, rock crawling, nieve profunda).

2. La Caja Reductora (Low): Ingeniería de Fuerza y Retención

La "Baja" o *Low Range* es el componente que define a un verdadero vehículo todoterreno. En minería de alta montaña, su uso no es opcional; es un procedimiento estándar de seguridad para el control de la inercia y la multiplicación de la fuerza motriz.

2.1 Física de la Multiplicación de Torque

El motor de combustión interna produce un par (*torque*) limitado, que depende de las revoluciones por minuto (RPM). En la altura geográfica, debido a la menor densidad del aire (hipoxia mecánica), un motor atmosférico pierde aproximadamente el 10% de su potencia por cada 1.000 metros de elevación. A 4.000 msnm, una camioneta puede haber perdido el 40% de su capacidad nominal.

La caja reductora actúa como un multiplicador mecánico de par. La relación de reducción R_{Low} típica varía entre 2.0:1 y 4.0:1.

- Ecuación de Torque a la Rueda:

$T_{rueda} = T_{motor} \times R_{transmisión} \times R_{transferencia} \times R_{diferencial}$

Ejemplo Práctico:
Supongamos una camioneta con 400 Nm de torque máximo.

- En 4H (Relación 1:1) y 1ra marcha (supongamos 4:1) y diferencial (3.73:1):
  - $T_{rueda} = 400 \times 4 \times 1 \times 3.73 = 5.968$ Nm
- En 4L (Relación 2.72:1 - estándar en muchas pickups):
  - $T_{rueda} = 400 \times 4 \times 2.72 \times 3.73 = 16.233$ Nm

Al engranar la 4L, casi **triplicamos** la fuerza disponible en las ruedas. Esto permite al vehículo vencer la gravedad en pendientes del 30% o superar la resistencia viscosa del barro profundo sin forzar el motor ni quemar el embrague.

2.2 Termodinámica de la Retención (Freno de Motor)

El uso más crítico de la 4L en alta montaña no es subir, sino **bajar**. Al descender pendientes largas y pronunciadas (comunes en caminos mineros), el vehículo convierte su energía potencial gravitatoria en energía cinética.
Si el conductor utiliza los frenos de servicio (discos y pastillas) para disipar esta energía, se produce una conversión de energía cinética a térmica.

E_c >Calor
En bajadas prolongadas, los frenos pueden alcanzar temperaturas de 500°C o más. A estas temperaturas, ocurren dos fenómenos peligrosos:

1. **Fading de Pastillas:** La resina de las pastillas se gasifica, creando una capa de gas entre la pastilla y el disco que impide la fricción.
2. **Ebullición del Líquido:** El calor se transfiere al líquido de frenos. Si este hierve, se generan burbujas de gas. Como el gas es comprimible (a diferencia del líquido), el pedal de freno se va al fondo sin aplicar presión a los calibradores. Resultado: pérdida total de frenos.

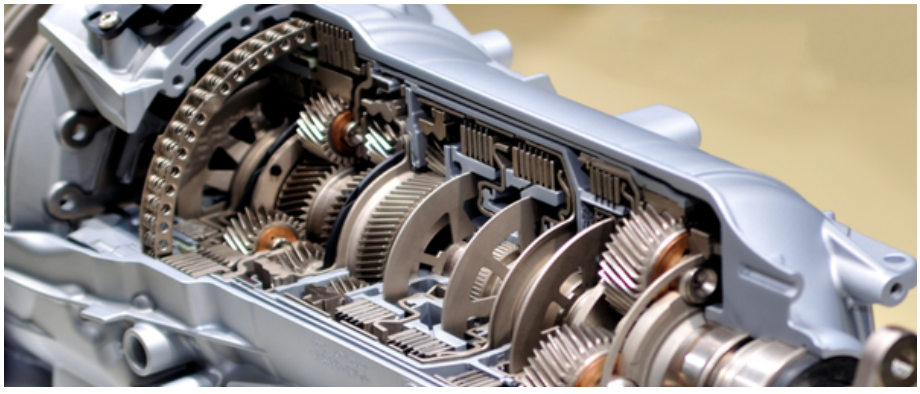
- La Solución Mecánica: Retención en 4L

Al descender en 4L, la relación de transmisión se invierte. Las ruedas intentan girar al motor. Debido a la alta relación de reducción (ej. 40:1 total), las ruedas deben ejercer una fuerza enorme para vencer la compresión del motor.

El motor actúa como un compresor de aire. En la fase de compresión de los cilindros (con la inyección de combustible cortada por la ECU al no pisar el acelerador), el pistón debe comprimir el aire, absorbiendo energía del movimiento del vehículo. Esta resistencia mecánica frena el vehículo.

- Protocolo de Seguridad:

En minería, la regla de oro es: **"Se baja en la misma marcha (y rango) en la que se subiría"**. Si una pendiente requiere 2da marcha en 4L para subir, se debe bajar en 2da marcha en 4L. Esto garantiza que la velocidad terminal del vehículo se mantenga controlada mecánicamente (ej. 10 km/h) sin tocar los frenos de servicio, manteniéndolos fríos y listos para una emergencia real.



3. Diferenciales y Asistencias: La Gestión Inteligente de la Adherencia

Tener fuerza en los ejes no sirve de nada si no se puede transmitir al suelo. Aquí entran en juego los diferenciales y sus sistemas de bloqueo o control. Para entenderlos, primero debemos comprender la "falla" inherente del diferencial abierto.

3.1 El Diferencial Abierto: La Ruta de Menor Resistencia

El diferencial es un dispositivo mecánico necesario que permite que la rueda exterior gire más rápido que la interior en una curva. Sin él, el vehículo arrastraría los neumáticos al virar. Mecánicamente, el diferencial abierto distribuye el par motor equitativamente (50/50) en términos de fuerza, pero permite variaciones infinitas en velocidad.

- El Problema Físico:

La mecánica del diferencial abierto tiene una característica que en off-road se convierte en un defecto fatal: la fuerza total aplicada al suelo está limitada por la rueda con menos tracción.

$T_{total} = 2 \times T_{rueda\ menor\ agarre}$

Si una rueda está en el hielo (adherencia ≈ 0) o en el aire, el par que puede soportar es casi cero. Por lo tanto, el par enviado a la rueda opuesta (que está en tierra firme) también será casi cero. Toda la energía del motor se convertirá en velocidad de giro inútil en la rueda que patina. El vehículo, aunque tenga 400 caballos de fuerza, no se moverá.

3.2 Bloqueo de Diferencial (Lockers): Tracción Absoluta

Para solucionar la limitación del diferencial abierto, se utilizan los bloqueos de diferencial (*Lockers*). Estos pueden ser mecánicos, neumáticos (ARB) o electromagnéticos (E-Locker, común en Toyota y Ford).

- Funcionamiento:

Al activar el bloqueo (generalmente en el eje trasero en camionetas mineras), se anula el mecanismo diferencial. Se une solidariamente el semieje izquierdo con el derecho.

  - Efecto Físico: Ambas ruedas están obligadas a girar a la misma velocidad angular, sin importar la tracción.

- $\Omega_{izq} = \Omega_{der}$
- **Resultado:** Si una rueda está en el aire, el 100% del par disponible se transmite a la rueda que está en el suelo, impulsando el vehículo.

- Uso Táctico y Riesgos:
  - **Cuándo usarlo:** Solo en situaciones de baja velocidad y muy baja adherencia (barro profundo, zanjas, escalones de roca, nieve profunda) y preferiblemente en trayectoria recta.
  - **Cuándo NO usarlo:** En pavimentos, curvas cerradas o superficies con buen agarre. Bloquear el diferencial trasero impide que las ruedas giren a distinta velocidad en una curva, lo que provocará que el vehículo intente seguir recto (subviraje) y arrastre el eje trasero, pudiendo romper los semiejes por fatiga torsional.

3.3 Control de Tracción Electrónico (A-TRC / TCS): La Solución Moderna

La mayoría de las flotas mineras modernas utilizan sistemas de control de tracción activo (como el A-TRC de Toyota). Este sistema no es un bloqueo mecánico, sino una simulación funcional.

- Mecanismo de Acción:

El sistema utiliza los sensores de velocidad de rueda del ABS. Si detecta que una rueda gira mucho más rápido que la otra (patinaje), la computadora activa la bomba del ABS y aplica presión de frenado específicamente a esa rueda que patina.

- Física de la Simulación:

Al frenar la rueda que patina, el sistema aumenta artificialmente el par resistente en ese lado. El diferencial abierto, por su naturaleza mecánica, reacciona enviando una cantidad igual de par a la rueda opuesta (la que tiene tracción).

$T_{rueda\ tracción} = T_{freno\ aplicado}$

- **Ventajas:** Mantiene la capacidad de dirección (a diferencia del bloqueo), es automático y protege la transmisión de golpes de par.
- **Desventajas:** Consume energía cinética (frena el avance), calienta los frenos si se usa excesivamente y no es tan inmediato como un bloqueo mecánico en obstáculos extremos. Sin embargo, para la mayoría de las situaciones mineras, es una herramienta extremadamente eficaz.

4. Neumáticos: La Interfaz Crítica y su Gestión Física

El neumático es el único componente que conecta toda la ingeniería del vehículo con la realidad del terreno. En minería, la selección y gestión de neumáticos (presión y dibujo) es una ciencia en sí misma.

4.1 Anatomía y Selección: AT vs. MT y el Índice de Carga

Tipos de Dibujo (Tread Pattern)



- **AT (All-Terrain):** El estándar en minería. Ofrecen un compromiso entre durabilidad en pavimento, tracción en ripio y capacidad de carga. Sus tacos están más juntos para reducir la resistencia al rodaje y el ruido, pero tienen suficientes canales para evacuar agua y grava.



- **MT (Mud-Terrain):** Diseñados con grandes bloques de caucho y enormes espacios vacíos (*voids*). Su función física es permitir que el barro o la nieve blanda se introduzcan entre los tacos y luego sean expulsados por la fuerza centrífuga ("auto-limpieza") al girar la rueda. Son excelentes en barro profundo pero peligrosos en hielo o pavimento mojado debido a la menor superficie de contacto neta (menos goma tocando el suelo).

Índice de Carga (Load Index)

Este es el parámetro de seguridad más crítico y a menudo ignorado. Es un código numérico (ej. 112, 121) que indica la carga máxima en kilogramos que el neumático puede soportar a su máxima presión de inflado.

- **Contexto Minero:** Las camionetas en faena operan frecuentemente cerca de su Peso Bruto Vehicular (PBV) debido a jaulas antivuelco, herramientas, pasajeros y muestras geológicas. Un neumático con un índice de carga insuficiente sufrirá una flexión excesiva en los flancos.

- **Física del Fallo:** La flexión repetida de los flancos genera calor por **histéresis** (fricción interna del caucho). En altura, donde el aire es menos denso y refrigera menos, este calor puede superar la temperatura de vulcanización del caucho, provocando la delaminación de las capas y un reventón explosivo. Siempre se debe verificar que el índice de carga sea igual o superior al especificado por el fabricante para carga plena.

4.2 Física de la Presión: Técnicas de Flotación vs. Corte

La presión de los neumáticos no es una constante; es una variable de ajuste que altera la física de la huella de contacto. Existen dos estrategias opuestas: Flotación y Corte.

4.2.1 Técnica de Flotación (Baja Presión)

Se utiliza en superficies deformables y profundas como **arena, barro profundo y nieve honda**.

- **Objetivo Físico:** Aumentar el área de contacto para reducir la presión ejercida sobre el suelo $P = \frac{F}{A}$

Al reducir la presión de inflado (ej. a 15–18 PSI), el neumático se "alarga" (efecto oruga), aumentando su superficie. Esto permite que el vehículo "flote" sobre el material en lugar de hundirse y excavar una trinchera.

- **Aplicación en Minería:** Cruce de zonas de arenales o nieve virgen profunda donde el hundimiento provocaría que el chasis toque el suelo (*high-centering*), inmovilizando el vehículo.

4.2.2 Técnica de Corte (Alta Presión / Neumático Angosto)

Se utiliza en superficies resbaladizas con fondo firme, como **hielo, nieve superficial ("slush") o barro líquido sobre fondo duro**.

- **Objetivo Físico:** Aumentar la presión específica sobre el suelo para penetrar la capa superficial resbaladiza. Un neumático más inflado (o más angosto) presenta un área de contacto menor. Esto concentra el peso del vehículo en una línea más delgada, permitiendo que el neumático "corte" a través de la nieve blanda o el barro líquido hasta encontrar el suelo duro o el asfalto debajo, donde existe tracción real.
- **Aplicación en Minería:** Caminos con capas finas de nieve compactada o hielo, donde flotar sería peligroso porque el vehículo perdería direccionalidad (efecto esquí). Se busca clavar los tacos o las laminillas en la superficie.

Tabla Resumen de Gestión de Presión y Terreno

La siguiente tabla sintetiza las configuraciones recomendadas basadas en los principios físicos discutidos. *Nota: Los valores de PSI son referenciales y deben ajustarse al peso del vehículo y tipo de neumático.*

Condición del Terreno	Estrategia Física	Configuración de Presión (PSI aprox.)	Objetivo Mecánico
Pavimento / Autopista	Eficiencia	Fabricante (ej. 32-35)	Reducir fricción y calor. Estabilidad.
Ripio / Calamina	Absorción	Media (25-28)	Permitir que el neumático envuelva piedras, reducir vibración.
Arena / Dunas	Flotación	Baja (12-18)	Maximizar área, evitar hundimiento.
Barro Profundo	Flotación	Baja (15-20)	Aumentar tracción por superficie ("remo"), flotar.
Nieve Profunda	Flotación	Muy Baja (10-15)	Evitar romper la capa base, mantenerse arriba.
Hielo / Nieve Dura	Corte	Normal/Alta (30-35)	Concentrar peso para penetrar la superficie dura o llegar al asfalto.
Rocas (Rock Crawling)	Amoldamiento	Baja (15-20)	Permitir que el neumático se amolde a la forma de la roca para agarre mecánico.

Conclusión

El dominio de la conducción 4x4 en alta montaña y minería no es un acto de fuerza bruta, sino de inteligencia mecánica. El conductor experto entiende que:

1. El sistema **4WD Part-Time** conecta físicamente los ejes y no debe usarse en pavimento para evitar daños catastróficos.
2. La **Caja Reductora (4L)** es su principal freno en los descensos, utilizando la compresión del motor para gestionar la inercia sin quemar los frenos.
3. Los **Diferenciales** y sus bloqueos son herramientas para dirigir el par motor, no soluciones mágicas, y deben usarse con precisión quirúrgica para evitar la pérdida de dirección.
4. Los **Neumáticos** son estructuras dinámicas cuya presión debe alterarse activamente (Flotación vs. Corte) para adaptarse a la física cambiante del suelo.

Al integrar estos conceptos de física e ingeniería en la toma de decisiones diaria, el operador garantiza no solo la eficiencia de la operación, sino la integridad de la vida humana en los entornos más hostiles del planeta.



REDSUMA

Manejo Defensivo de Vehículos 4x4 en Alta Montaña y Faenas Mineras

Módulo 2:

Mecánica Avanzada y Física del Vehículo 4x4.

redsuma.cl