

## Ud 1. T3. SELECCIÓN DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS

### Anejo 1. MECÁNICA Y DINÁMICA DE LAS MÁQUINAS AGRÍCOLAS

1. ESTABILIDAD
2. INTERACCIÓN SUELO-RUEDA
  - 2.1. Resbalamiento
  - 2.2. Coeficiente de resistencia a la rodadura
  - 2.3. Coeficiente de tracción bruta (adherencia)
  - 2.4. Coeficiente de tracción neta y tracción neta
  - 2.5. Rendimiento a la tracción
  - 2.6. Predicción de los coeficientes de rodadura y tracción
  - 2.7. Índice de movilidad de un neumático
3. BALANCE DE POTENCIA

#### REACCIONES DEL SUELO SOBRE LAS RUEDAS DE UN TRACTOR SIN APEROS NI LASTRES QUE DESCANSA EN UN TERRENO HORIZONTAL

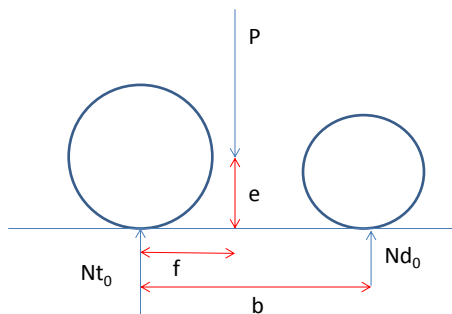
$$N d_0 = P f / b$$

Valores normales de  $f/b$ :

Tractores simple tracción: 0.35

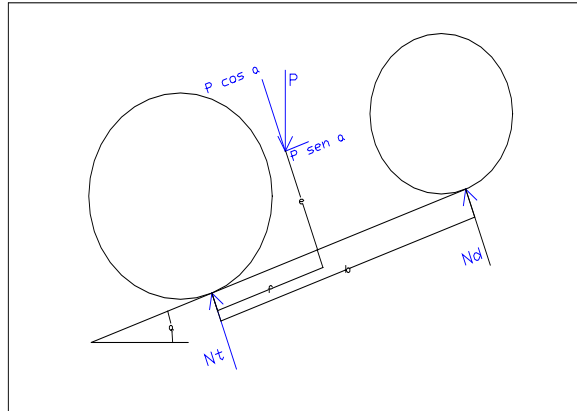
Tractores doble tracción rígidos: 0.4

Tractores doble tracción articulados: 0.6



Condición de estabilidad longitudinal:

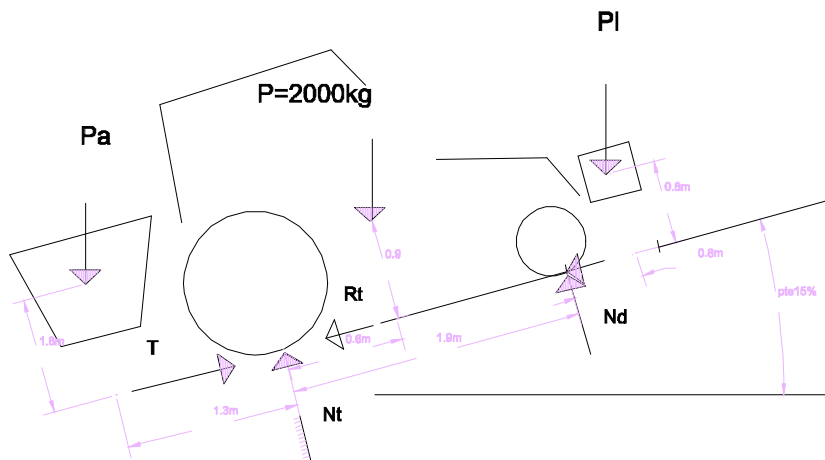
$$N_d > 0,2 N_{d0}$$



Condición de estabilidad longitudinal

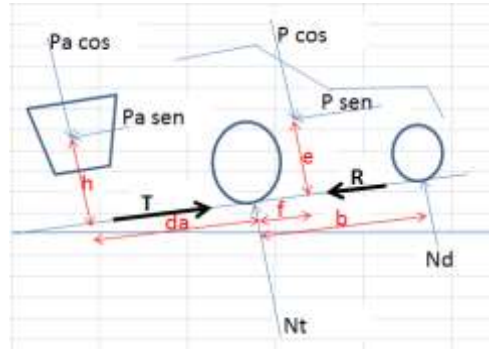
$$N_d > 0,2 N_{d0}$$

$$N_d = (M_e - M_v)/b$$



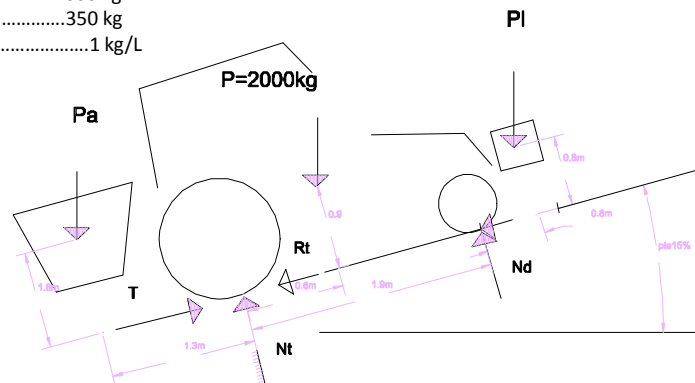
**Apero suspendido en posición de transporte**

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_v: (Pa + P)\cos \alpha = Nt + Nd \\ \sum F_h: T = (Pa + P)\sen \alpha + R \\ \sum M: Pa \cos \alpha da + Pa \sen \alpha h + P \sen \alpha e + Nd b = P \cos \alpha f \end{array} \right.$$



**Ejemplo 1.** Un tractor de simple tracción lleva una abonadora centrífuga suspendida de 800 l de capacidad. Calcula el lastre delantero necesario para superar pendientes ascendentes del 20%, manteniendo la condición de estabilidad ( $Nd \geq 0.2 Nd_0$ ). Datos:

- Distancia entre ejes.....1.9 m
- Dist. cdg tractor a eje trasero.....0.6 m
- Dist. cdg lastre a eje delantero.....0.8 m
- Dist. cdg abonadora a eje trasero.1.3 m
- Altura del cdg tractor en vacío.....0.9 m
- Altura del cdg del lastre.....0.8 m
- Altura del cdg abonadora llena.....1.8 m
- Peso tractor en vacío.....2000 kg
- Peso abonadora vacía.....350 kg
- Densidad del abono.....1 kg/L



**SOLUCIÓN**

$$Pa = 800 + 350 = 1150 \text{ kp}$$

$$\text{Condición de estabilidad: } Nd \geq 0.2 \text{ Ndo} = 0.2 \cdot 2000 \cdot 0.6/1.9 = 126.3 \text{ kp}$$

Momentos respecto al punto de apoyo eje trasero:

**a) Vuelcan:**

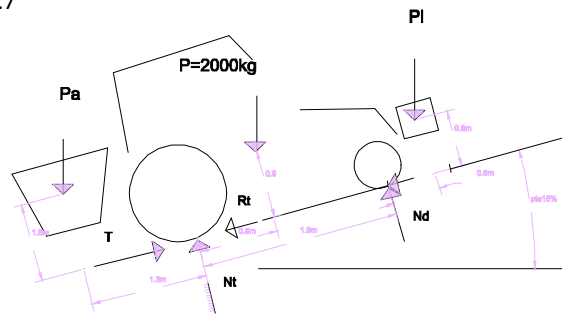
$$\begin{aligned} Nd \cdot 1.9 &= 240 \\ Pl \cdot 0.8 \cdot 0.2 &= Pl \cdot 0.16 \\ P \cdot 0.9 \cdot 0.2 &= 360 \\ Pa \cdot 1.8 \cdot 0.2 &= 414 \\ Pa \cdot 1.3 &= 1495 \end{aligned}$$

**b) Estabilizan**

$$\begin{aligned} Pl \cdot 2.7 &= Pl \cdot 2.7 \\ P \cdot 0.6 &= 1200 \end{aligned}$$

$$Pl \cdot 0.16 + 2509 = Pl \cdot 2.7 + 1200$$

$$Pl = 515 \text{ kp}$$



Apero suspendido en posición de trabajo ( $Pa \cos \alpha \approx 0$ )

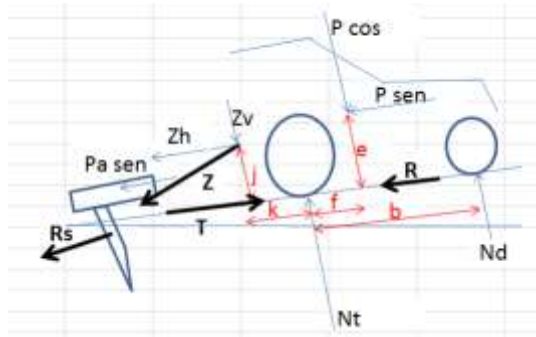
$$Z = Rs + Pa \text{ sen } \alpha$$

$$Z = Zv + Zh$$

$$\sum Fh: T = R + P \cos \alpha + Zh$$

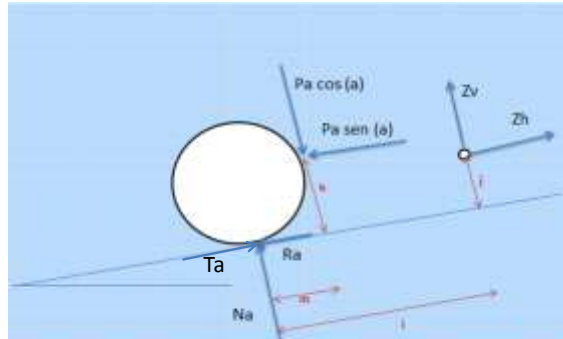
$$\sum Fv: Nt + Nd = P \cos \alpha + Zv$$

$$\sum M: Nd \cdot b + P \text{ sen } \alpha \cdot e + Zh \cdot j + Zv \cdot k = P \cos \alpha \cdot f$$

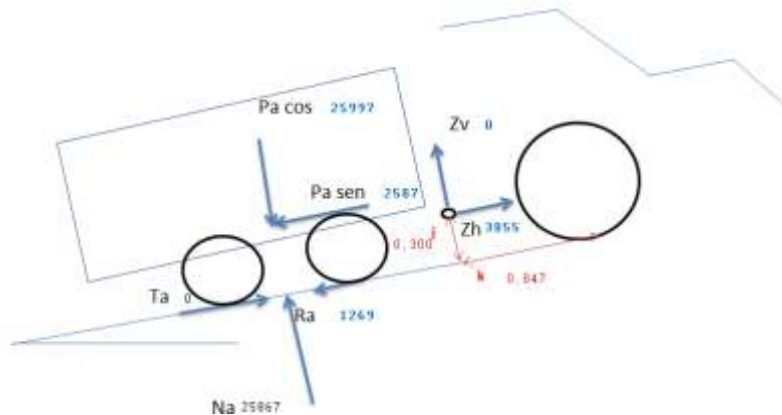


**Apero semisuspendido**

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_v: Pa \cos \alpha = Z_v + Na \\ \sum F_h: Z_h + Ta = Ra + Pa \sin \alpha = Cra Na + Pa \sin \alpha \\ \sum M: Z_h j + Pa \cos \alpha m = Z_v i + Pa \sin \alpha h \end{array} \right.$$

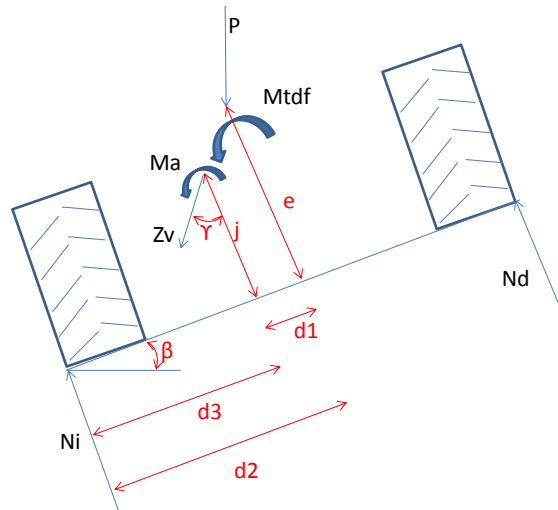
**Apero arrastrado ( $Z_v = 0$ )**

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_v: Pa \cos \alpha = Na \\ \sum F_h: Z_h + Ta = Ra + Pa \sin \alpha = Cra Na + Pa \sin \alpha \end{array} \right.$$



### Estabilidad lateral

$$\left\{ \begin{array}{l} Nd + Ni = P \cos \beta + Zv \cos \gamma \\ P \cos \beta d_2 + Zv \cos \gamma d_3 = Mtdf + Ma + P \sin \beta e + Zv \sin \gamma j + Nd d_2 \end{array} \right.$$



**Ejercicio.** En el catálogo del autocargador del esquema adjunto (J. Deere 810E) encontramos los siguientes datos:

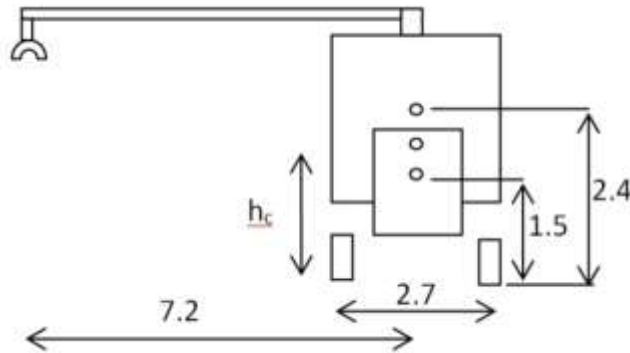
- Máxima longitud alcanzable por la grúa: 7.2/8.7/9.8 m
- Par de elevación bruto (gross lifting torque): 76 kNm
- Par de giro (slewing torque): 19 kNm
- Masa en vacío: 13 000 kg
- Carga máxima: 9 000 kg



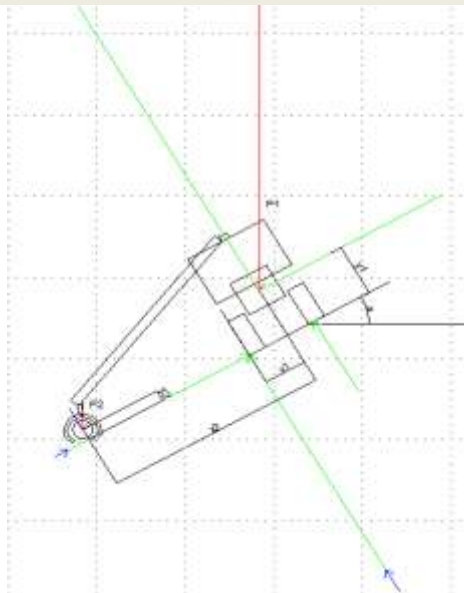
Doc. John Deere

**Calcula:**

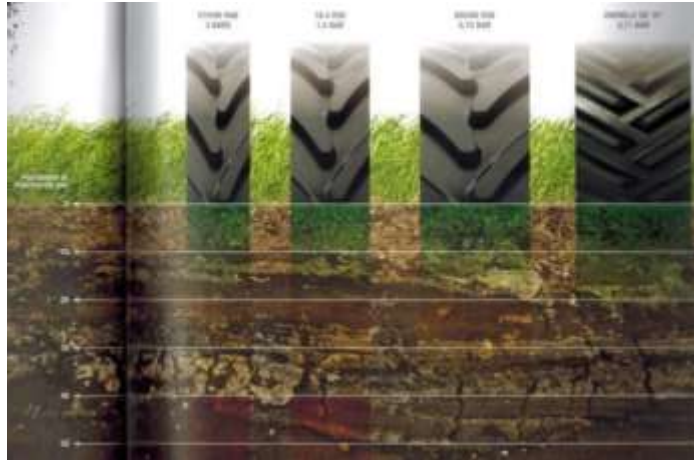
- a) Altura del centro de gravedad (cdg) del vehículo cargado ( $h_c$ ) si, suponemos que la altura del mismo en vacío es 1.5 m y la altura del cdg de la carga completa 2.4 m.
- b) Máxima carga lateral a 7.2 m de distancia desde el centro del vehículo, que provoca el vuelco lateral, con el autocargador descargado y en horizontal.
- c) Idem b) pero con el autocargador totalmente cargado.



- d) Pendiente lateral máxima que provocaría el vuelco, si el autocargador izara una carga, situada a 7.2 m del centro del vehículo y por el lado de la máxima pendiente, con su máxima capacidad de elevación.



# INTERACCIÓN SUELO-RUEDA



**Resbalamiento (Cb)**

$$Cb = (Dt - Dr) / Dt$$

$$Cb = (Vt - Vr) / Vt$$

Dt, distancia teórica  
Dr, distancia real

Vt, velocidad teórica  
Vr, velocidad real

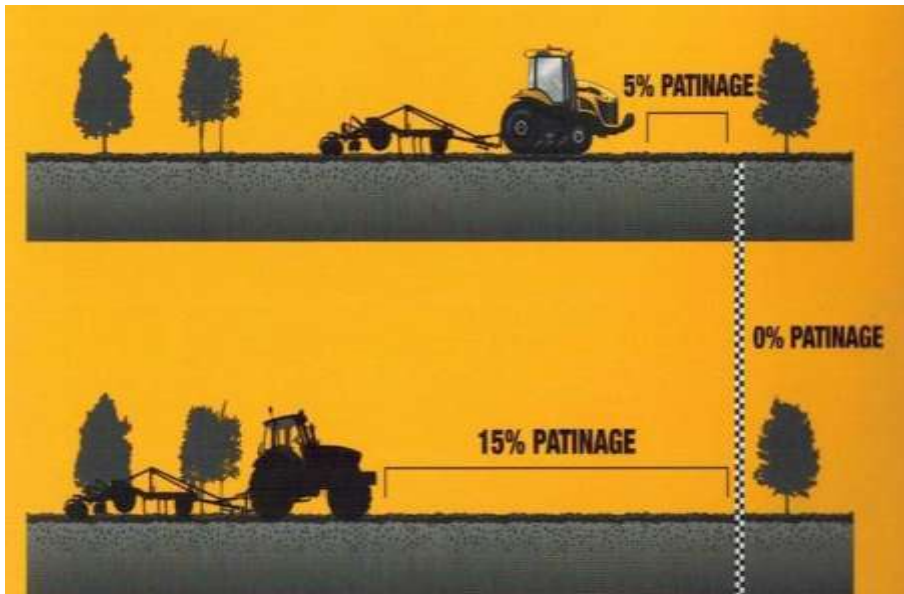
**Ejemplo.** Un tractor rueda sobre un suelo portando el apero de labor elevado, cuando las ruedas motrices dan 20 vueltas completas se recorre una distancia de 113 m.

A continuación se deja caer el apero y se vuelven a medir la distancia recorrida tras 20 vueltas de la rueda, y se observa que son 98 m.

¿Cuánto vale el resbalamiento?



## Resbalamiento



### Efectos del resbalamiento:

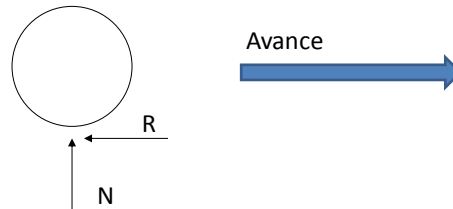
- a) Disminuye la capacidad efectiva de trabajo
- b) Desgasta los neumáticos
- c) Erosiona el suelo
- d) En terrenos sueltos (no firmes como el asfalto), sin resbalamiento hay muy poca tracción

### Resistencia a la rodadura (R)

Fuerza de fricción que se opone al avance de las ruedas

**Coefficiente de resistencia a la rodadura**

$$C_r = R / N$$



**N**, reacción del suelo sobre la rueda, que se opone al peso transmitido por ésta

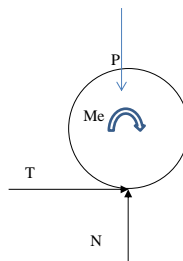
### Tracción (T)

capacidad de tiro horizontal de un neumático

Depende de:

- suelo
- neumático
- peso

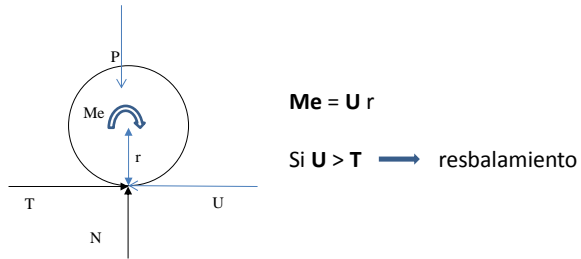
**Coefficiente de tracción bruta (adherencia):**  $C_t = T / N$



**P**, peso que recae en el neumático

**Me**, par motor en el eje

## Tracción (T) capacidad de tiro horizontal de un neumático



**P**, peso que recae en el neumático

**Me**, par motor en el eje

**U**, fuerza periférica en la rueda debida al par **Me**

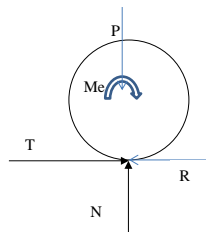
**r**, radio de la rueda

## Tracción neta

$$T_n = T - R$$

Coefficiente de tracción neta

$$C_{tn} = (T - R) / N$$

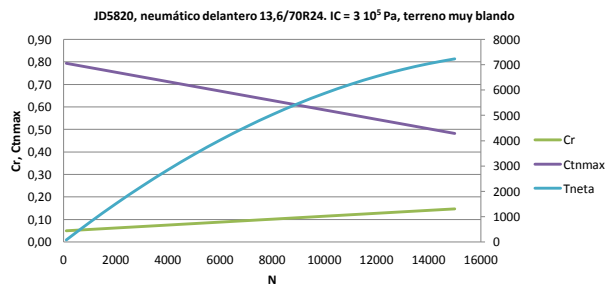
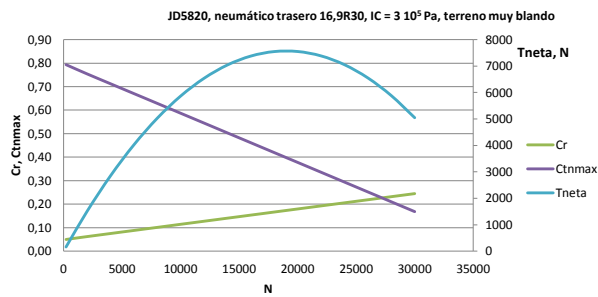


## Tracción neta

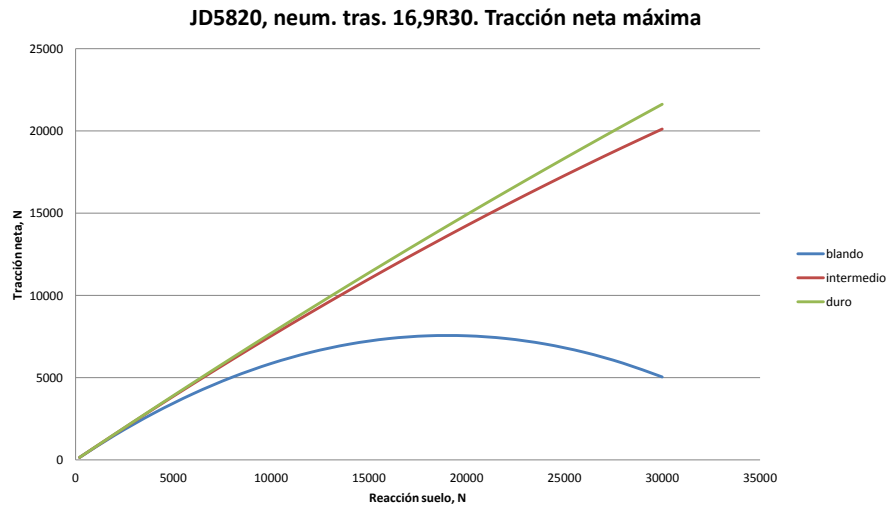
$$T_n = T - R = C_{tn} N$$

¿Cuánto más peso o lastre se añade a un tractor,  
mayor será la fuerza de tracción neta?

## INTERACCIÓN SUELO-RUEDA



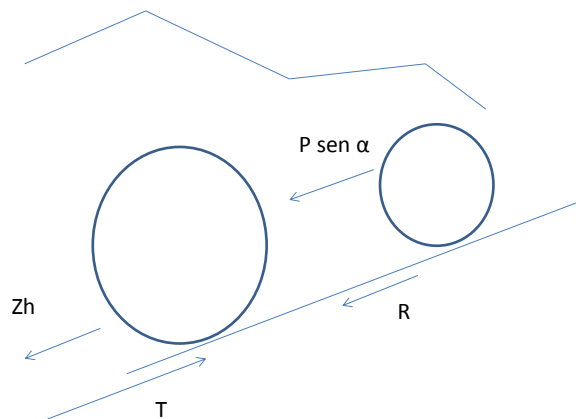
## INTERACCIÓN SUELO-RUEDA



## Rendimiento a la tracción

Mide la eficacia con la que se transmite la potencia del eje al tiro, para realizar trabajos de tracción

$$T = R + \sum P \operatorname{sen} \alpha + Zh$$



### Rendimiento a la tracción ( $\eta_t$ )

Si  $N_b$  es la potencia a la barra,  $N_e$  la potencia en el eje y  $T$  es la fuerza de tracción

$$N_e = T v_t$$

$$N_b = (T-R) v_r$$

$$N_b = (T-R) v_t (1 - C_b)$$

$$\eta_t = \frac{N_b}{N_e} = \frac{(T-R)v_r}{T v_t} = \left( \frac{T}{T} - \frac{R/N}{T/N} \right) \frac{v_r}{v_t} = \left( 1 - \frac{C_r}{C_t} \right) (1 - C_b)$$

$C_r$ , coeficiente de rodadura

$C_t$ , coeficiente de tracción

$C_b$ , coeficiente de resbalamiento

### Rendimiento a la tracción ( $\eta_t$ )

**Ejemplo 3.** Calcular el ancho de trabajo que permite el máximo rendimiento a la tracción de un tractor si la resistencia que ofrece el apero vale  $Z = 4000 \text{ a}$

$Z$  se expresa en N

el ancho  $a$  en m

el tractor pesa 40000 N

tracción total

coeficiente de rodadura: 0.08

Relación entre resbalamiento y coeficiente de tracción neta:

$$C_b = -0.13 \ln(1 - C_{tn}/0.7)$$

### Ejemplo 3, solución

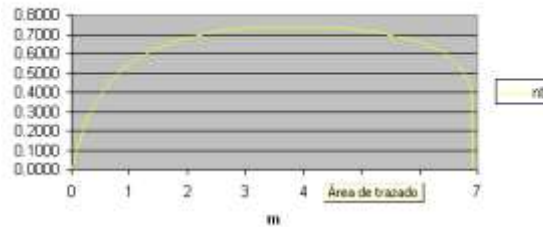
$$T = Z + R$$

$$C_t = T/N = Z/N + R/N = 4000 a / N + 0.08$$

$$\eta_t = (1 - 0.08 / [0.1 a + 0.08]) (1 + 0.13 \ln(1 - [0.1 a]/0.7))$$

a	1	2	3	4	5	6	7
$\eta_t$	.54	.68	.73	.74	.72	.66	0

Rendimiento a la tracción en función del ancho de trabajo



### Predicción de los coeficientes de rodadura y tracción

- Fórmulas empíricas para predecir el comportamiento de los neumáticos (resistencia a la rodadura y tracción)
- Hacen estimaciones en función del índice de cono (compactación suelo) y de las dimensiones de los neumáticos
- Usaremos las del trabajo:

GEE CLOUGH et al. 1978. **The empirical prediction of tractor implement field performance.** Journal of Terramechanics.

Basadas en múltiples ensayos realizados por el National Institute of Agricultural Engineering (NIAE) de Inglaterra.

#### Más información:

Sánchez-Girón V.. 1996. Dinámica y mecánica de suelos. Ediciones Agrotécnicas, s.l. Madrid, 426 pp.

**Índice de movilidad del neumático (m)**

$$m = \frac{IC \cdot Ab \cdot X(def/Y)^{0.5}}{N(1 + \frac{Ab}{2X})}$$

$$m = \frac{IC \cdot Ab \cdot X \cdot 0.45}{N(1 + \frac{Ab}{2X})}$$

**IC**, índice de cono del suelo, Pa

**Ab** (ancho del balón del neumático, m

**X**, diámetro del neumático, m

**def**, deformación del neumático por efecto del peso

**Y**, altura del balón del neumático, m

**N**, reacción del suelo sobre la rueda, N

Valores típicos de Índice de Cono:

Suelo recién labrado: 300 kPa

Suelo durante el cultivo (regado pero sin pase de vehículos): 1000 kPa

Suelo por el que ha circulado algún vehículo, pero pocos: 1500 kPa

Suelo bastante pisoteado y transitado: 2000 kPa

**Predicción de los coeficientes de rodadura y tracción en función de 'm'**

$$\text{Rodadura: } Cr = 0.049 + (0.287/m)$$

$$\text{Tracción neta: } Ctn_{max} = 0.796 - (0.92/m)$$

$$Ctn = Ctn_{max} (1 - e^{-kCb})$$

$$k Ctn_{max} = 4.838 + 0.061 m$$



$$ctn = \left(0.796 - \frac{0.92}{m}\right) \left(1 - e^{-\frac{(4.838+0.061m)Cb}{0.796 - \frac{0.92}{m}}}\right)$$

$$Cb = -\frac{ctnmax}{4.838 + 0.061m} \ln\left(1 - \frac{Ctn}{Ctnmax}\right)$$

Coefficientes de rodadura, y tracción medios

Tipo suelo	Cr	Ct	Cb óptimo
Hormigón	0.03	1	
Tierra firme	0.1	0.8	0.09
Tierra labrada superficialmente	0.2	0.6	0.12
Tierra labrada en profundidad	0.3	0.5	0.15
Rastrojo cereal	0.1	0.5	0.1
Prado	0.1	0.6	0.1
Barbecho	0.2	0.5	0.1

### Predicción de los coeficientes de rodadura y tracción.

Ejemplo. Calcular el efecto del cambio de la medida de los neumáticos de un tractor sobre la rodadura, y la tracción, suponiendo que cada rueda soporta 20 kN y que el suelo presenta unos valores de IC de 400 kPa y 1500 kPa. Medidas neumáticos: 20.8 R 38, 18.4 R 38.

#### Solución:

a) **20.8R38:**  $Ab = 20.8 \cdot 0.0254 = 0.53 \text{ m}$

$$X = (Ab \cdot 2 \cdot 0.7 + 38) \cdot 0.0254 = 1.7 \text{ m}$$

b) **18.4 R38:**  $Ab = 0.47$

$$X = 1.62$$

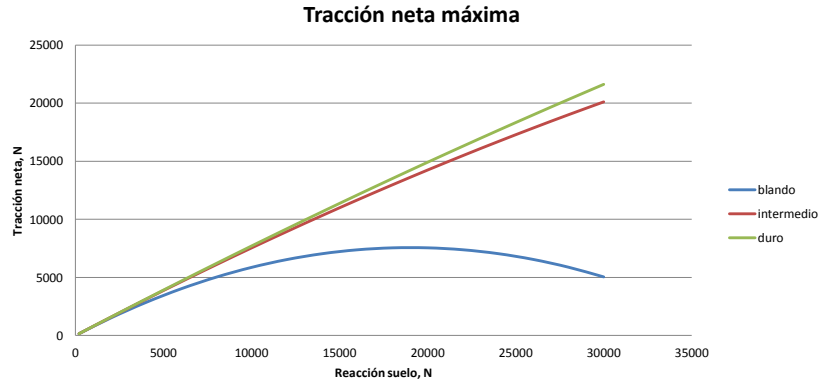
$$m = IC \cdot Ab \cdot X \cdot 0.45 / (N \cdot [1 + Ab / 2X])$$

### Predicción de los coeficientes de rodadura y tracción.

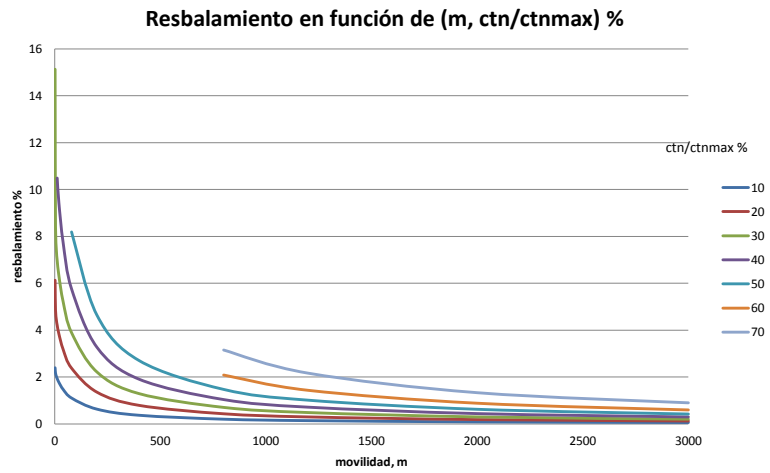
Ejemplo 4. Calcular el efecto del cambio de la medida de los neumáticos de un tractor sobre la rodadura, y la tracción, suponiendo que cada rueda soporta 20 kN y que el suelo presenta unos valores de IC de 400 kPa y 1500 kPa. Medidas neumáticos: 20.8 R 38, 18.4 R 38.

	20.8R38	20.8R38	18.4R38	18.4R38
	400 kPa	1500 kPa	400 kPa	1500 kPa
m	7.0	26.3	5.98	22.4
cr	0.090	0.060	0.097	0.062
ctnmax	0.66	0.76	0.64	0.75

**Aplicación al tractor JD5820 de la UDMTA-DIRA  
Neumático trasero 16.9R30**



**Aplicación al tractor JD5820 de la UDMTA-DIRA  
Neumático trasero 16.9R30**



# Interacción suelo-rueda

**Tracción**, la capacidad de tiro del tractor depende de:

- su masa
- los lastres
- número de ejes motrices
- tipo de neumáticos/sistema de rodadura
- compactación y tipo de suelo...



## FACTORES LIMITANTES AVANCE

La capacidad de un vehículo para superar una pendiente o efectuar un trabajo de tracción puede estar limitada por:

- a) la estabilidad longitudinal
- b) por la capacidad de tracción
- c) por el par disponible en el eje, que depende de:
  - la potencia (par motor)
  - las relaciones de transmisión motor-eje

Pendientes máximas recomendadas en la bibliografía  
para pistas y calles de desembosque

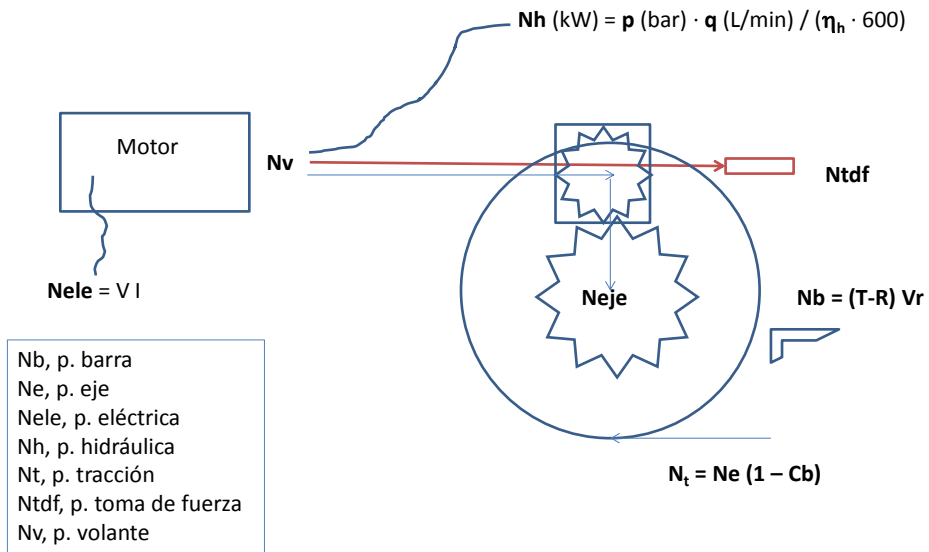
Terreno	vehículo	Pendiente %	Pendiente máxima %	Sentido pendiente
Vía forestal <sup>1</sup>	camión	12	15	Ambos
Pista permanente <sup>1</sup>	Camión/tractor	15	20	Ambos
Pista temporal <sup>1</sup>	tractor	20	30	Ambos
Calle desembosque <sup>1</sup>	tractor	60	60	Descendente

<sup>1</sup>Tolosana et al, 2005

## BALANCE DE POTENCIA



## BALANCE DE POTENCIA



## POTENCIA

**Potencia = Fuerza · velocidad lineal**

$$W = N \cdot m/s$$

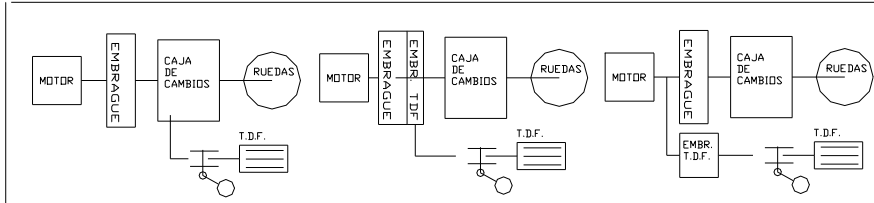
**Potencia = Par · velocidad de giro**

$$W = Nm \cdot s^{-1}$$

### Potencia en la toma de fuerza (N<sub>tdf</sub>)

se puede transmitir toda la potencia del motor con unas pérdidas mínimas:

$$\eta_{tdf} = \frac{N_{tdf}}{N_v} = 0,85-0,9$$



### Potencia en el eje (Ne)

Suele ser la principal forma de uso de la potencia del motor

Rendimiento de la transmisión:  $\eta_{tr} = Ne/Nv$

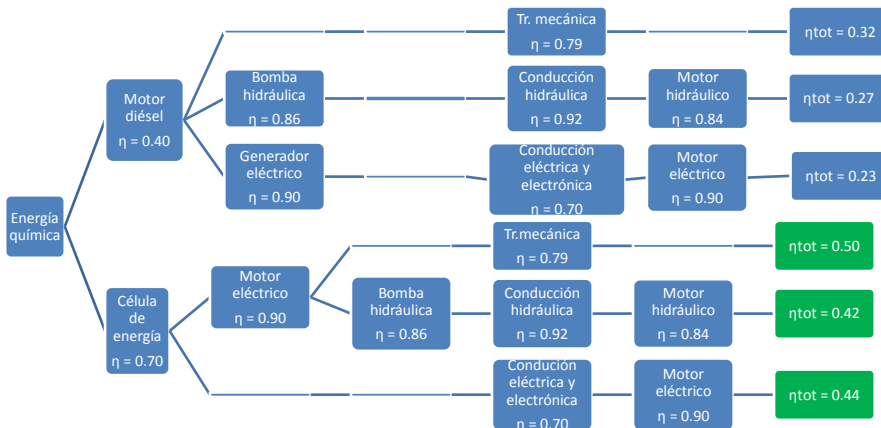
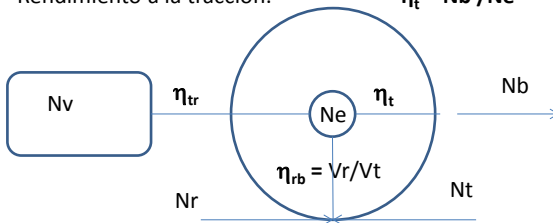
Potencia usada en tracción:  $N_t = Ne (1 - Cb) = T Vt (1 - Cb) = T Vr$

Potencia útil al tiro ( barra):  $Nb = (T-R) Vr$

Potencia consumida en rodadura:  $Nr = R Vr$

Potencia en el eje:  $Ne = T Vt$

Rendimiento a la tracción:  $\eta_t = Nb / Ne$



Eficiencia energética de diferentes formas de transformación y transporte de la energía química en mecánica en vehículos agrícolas.



## CVT hidrostáticas

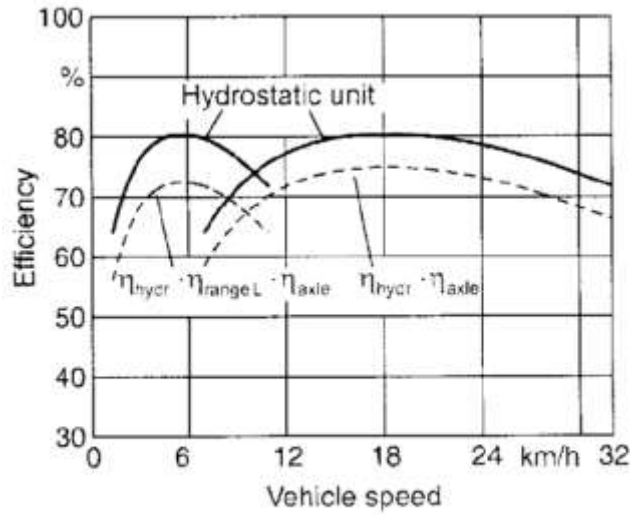


Fig. 8 Full load efficiencies estimated for the

## CVT hidrostáticas

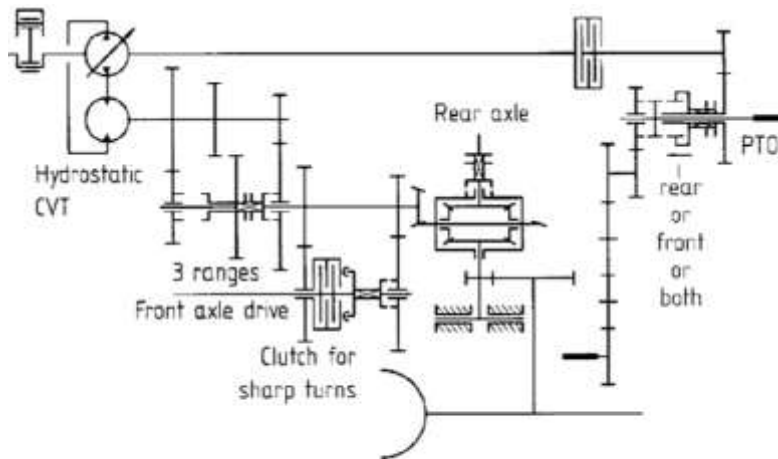


Fig. 23 Drive train of Yanmar tractors with hydrostatic CVT (swash plate units) for about 20-25 kW rated engine power.

## CVT combinadas

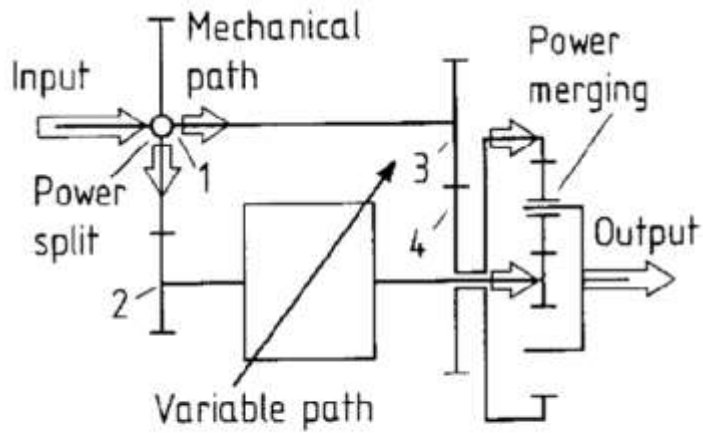
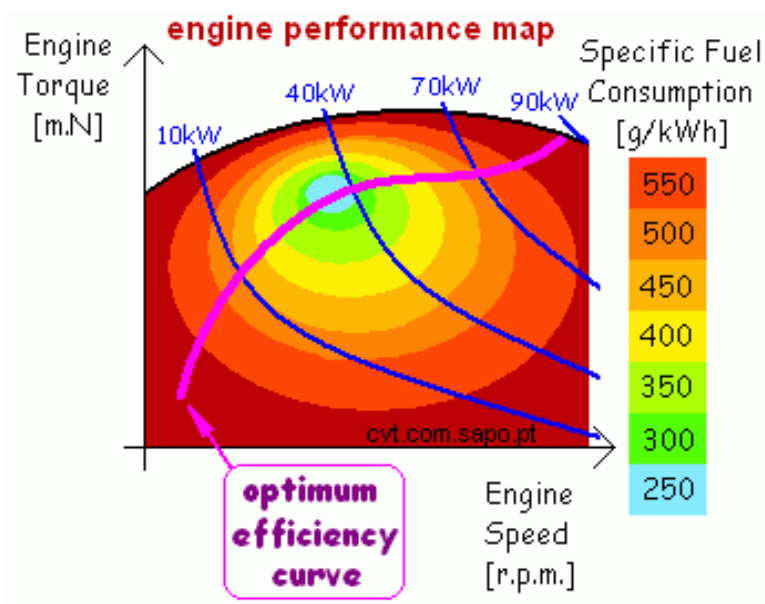


Fig. 27 Principle of a CVT with external power split and two power transmitting paths.

[Link a CVTEnd](#)



### Resistencia del aire

$$R_x = (1/2) \rho v^2 A C_x$$

$\rho$ , densidad del aire, kg/m<sup>3</sup> 1.2 kg/m<sup>3</sup> promedio)

$A$ , sección frontal, m<sup>2</sup>

$V$ , velocidad del vehículo, m/s

$C_x$ , coeficiente de forma. Valores típicos: 0.5 para camiones y 0.33 para turismos.

Potencia necesaria para vencer la resistencia del viento:

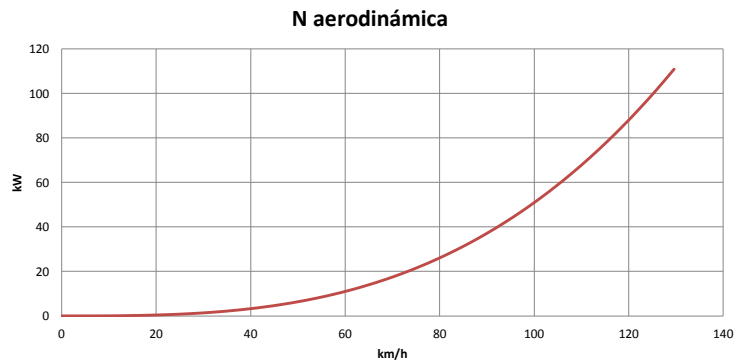
$$N_{\text{aire}} = \frac{1}{2} A \rho v^2 C_x v$$

$$N_{\text{aire}} = \frac{1}{2} A \rho v^2 C_x v$$

#### Ejemplo:

Tractor con una sección frontal de 2.2 x 3 m = 6.6 m<sup>2</sup>,  $C_x = 0.6$ ,  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$

La potencia consumida en vencer la resistencia del viento, en función de la velocidad, se puede apreciar en la siguiente figura:



$$N_{\text{aire}} = \frac{1}{2} A \rho v^2 C_x v$$

**Problema:** Calcula la potencia necesaria en el volante del motor de un camión articulado que circula por una carretera bien asfaltada, subiendo una pendiente del 3% a 80 km/h, suponiendo que: la masa máxima del conjunto es de 36 t. El frontal del camión mide 2.5 m de ancho por 3.8 m de alto, siendo el coeficiente aerodinámico  $CX = 0.6$ , el coeficiente de rodadura vale 0.015 y el rendimiento a la transmisión es del 90 %.

Compáralo con la potencia que necesita un camión rígido forestal que transita por pistas con pendientes ascendentes del 10%, a 20 km/h, siendo la masa máxima del conjunto 26 t, el frontal del camión mide 2.5 m de ancho por 3.8 m de alto, siendo el coeficiente aerodinámico  $CX = 0.7$ , el coeficiente de rodadura vale 0.08 y el rendimiento de la transmisión es del 85 %.

### Potencia consumida en aceleraciones

$$N_{\text{acel}} = M a$$

**M**, masa del vehículo

**a**, aceleración

**Ejemplo.** Calcula el tiempo que tardará un camión con 38 t de masa en pasar de 0 a 80 km/h si dispone de 100 kW de potencia para las aceleraciones.

### Potencia hidráulica (Nh)

- Todos los tractores proporcionan una parte apreciable de su potencia en forma de potencia hidráulica.
- Las máquinas hidrostáticas transmiten toda su potencia mediante el sistema hidráulico.

$$N_h \text{ (kW)} = p \text{ (bar)} * q \text{ (l/min)} / (\eta_h * 600)$$

rendimiento hidráulico  $\eta_h \approx 0.5-0.7$

Ejemplo: un tractor que suministra 50 L/min de aceite a una presión de 175 bar, con un  $\eta_h = 0.6$ , necesita 24 kW de potencia mecánica para accionar el sistema hidráulico.





Otros consumos de potencia: eléctrica

$$Nele = V I$$



**LEESON**  
DIRECT CURRENT  
PERMANENT MAGNET MOTOR

CAT. NO.	108998.00		
MODEL	C4D17NZ47B		
R.P.M.	1800	H.P.	1/2
VOLTS	24	TYPE	DN
AMPS	20	SER. FACT.	1.0
DUTY	CONT	MAX. AMB.	40 °C
FRAME	S56Y	INSUL. CLASS.	H3
TORQUE	17.5	IRCH. LBS.	F.F. 1.0
ENCL.	TENV	DATE CODE	C15G

TO CHANGE ROTATION INTERCHANGE LINE CONNECTIONS

**LEESON ELECTRIC**  
GRAFTON, WISCONSIN - A REGAL-BELDIT COMPANY

www.leeson.com 081259.01

**WARNING**

Failure to properly operate & ground this motor may cause serious injury to property and/or personnel. Read operating instructions.

⚡

Disconnect power before removing terminal box cover and/or performing maintenance. Ground in accordance with National Electric and local codes.

⚙️

Moving parts can crush and cut. Keep hands clear.

081241



**L'écimeuse électrique**  
**PELLENC**  
Une coupe fran

**... au service de l'écimage**

Cette nouvelle gamme de modèles vous étonnera par une énergie électrique hautement performante. Conçue pour le jardiennage de modèles de coupe matériels électriquement, elle est équipée, le système de coupe rotatif est entraîné par un moteur électrique asynchrone spécial. Pour éviter les projections et éviter de couper l'opérateur, le système (24 ans de long) tourne à des vitesses élevées, de l'ordre de 2 200 à 4 000 tr/min. Seul le démarrage électrique permet d'obtenir ces vitesses. Les courants élevés au démarrage sont évités grâce à un système spécial de démarrage qui évite de mettre en sur-régime. Facile à mettre en œuvre, cette écimeuse est 20% plus légère que le matériel existant. L'utilisation de l'écimeuse électrique avec des végétaux secs permet de l'ordre de 2 200 tr/min de feu à 2 200 tr/min permet une autonomie supplémentaire de carburant.

Deux modèles d'alimentation :  
- 3 kw (20 modules max)  
- 9 kw (50 modules max)

**Moteurs électriques et alternateurs**  
PELLENC assure la demande des modules électriques avec la garantie de 3 ou 5 ans.  
Le montage se réalise sur tous types de châssis à ventouse ouverte. Montage et fonctionnement, qui sont effectués par vous-même, sans aucune intervention technique.



**Ejemplos de aplicación de la teoría de estabilidad y potencia a la selección de aperos**

Comparar dos tractores a los que se les acoplarían dos aperos:

**John Deere 5820****Lamborghini 990****Pulverizador hidroneumático arrastrado Berthoud 2000****Vibrador de troncos Topavi**