

POTENCIA DE

Las prestaciones de los tractores agrícolas, como máquinas productoras de energía, quedan definidas, principalmente, por la potencia que pueden desarrollar.



Pero esta potencia en el tractor se utiliza de formas muy diferentes: para accionar una máquina mediante una transmisión mecánica, proporcionando un caudal de aceite que moverá un motor hidráulico o accionará un cilindro, pero sobre todo, convertida, a través de los elementos de propulsión que son las ruedas, las bandas de goma o las cadenas, en fuerza de tracción.

Cuando comienza la mecanización de la agricultura, la 'potencia' disponible en tractor se valora en fun-

ción del tamaño del arado que podía arrastrar, y los primeros ensayos se establecen sobre la base de medir su capacidad de tracción para diferentes situaciones agrícolas.

No hace muchos años que en los campos se realizaban pruebas de 'potencia' enganchando tractores uno contra otro de manera que pudieran demostrar su 'fuerza', como antes se había hecho con personas o con animales de tiro. Sin embargo, potencia de tracción no es equivalente al esfuerzo máximo que puede realizar un

tractor, ya que la potencia depende tanto del esfuerzo como de la velocidad a la que éste se realiza.

Con el paso de los años, al mejorar el conocimiento de los fenómenos de rodadura y patinamiento que se producen cuando un vehículo se desplaza por un suelo agrícola, el ensayo directo de la capacidad de tracción ha perdido interés, ya que resulta posible calcularla con bastante aproximación cuando se conoce la potencia disponible en el motor y las características dinámicas del vehículo que lo monta.

TRACCIÓN

Luis Márquez
Dr. Ing. Agrónomo

Sin embargo, la potencia de tracción, o potencia a la barra de tiro, es de la mayor importancia para el usuario de los tractores agrícolas, por lo que vamos a proceder a realizar un análisis detallado de los factores que inciden sobre ella.

DEFINIR LA POTENCIA DE TRACCIÓN

Habitualmente el tractor se utiliza para arrastrar un apero, una máquina o un remolque, y para ello necesita una fuerza de tiro suficiente, capaz de vencer las resistencias que el equipo remolcado ofrece. Esta fuerza, además, tiene que producirse a una cierta velocidad, la adecuada para la labor agrícola que se desea efectuar.

Considerando la potencia como producto de la fuerza por la velocidad, se define la potencia a la barra, también llamada de tracción o de tiro, como el producto de la fuerza necesaria para arrastrar el apero por la velocidad real a la que avanza el conjunto.

Así, un apero que necesita 1 000 kilos-fuerza (9 800 newton) de fuerza de tiro, cuando trabaja a 7.2 km/h (2 m/s) de velocidad real, necesitará que el tractor le suministre una potencia de tracción de $9\,800 \times 2 = 19\,600$ vatios = 19.6 kW (26.6 CV - utilizando el factor de conversión de unidades de 0.736 kW/CV).

La capacidad de tracción

El par motor producido en el volante de éste, para las diferentes condiciones de funcionamiento, sigue el camino de la transmisión (caja de cambio, diferencial, reducciones finales) hasta llegar a las ruedas del tractor.

En este camino se amplifica, debido a la disminución de la velocidad que sucesivamente realizan los diferentes elementos que componen la

transmisión, y, así, el par que aparece en las ruedas será el que había en el motor multiplicado por la relación de transmisión correspondiente a la velocidad (relación del cambio) que se tenga seleccionada.

Para un tractor trabajando en una marcha corta, en la que cada 200 vueltas del motor se produce una vuelta en el eje de las ruedas motrices, un par motor de 30 decanewton-metro [daN.m] (aproximadamente 30 metros-kilo fuerza [m.kg]), que es el que le proporcionaría un motor de 80-90 CV), daría en las ruedas un par de 6 000 daN.m, menos una cantidad comprendida aproximadamente entre un 7 y un 13 por 100 de pérdidas inevitables, debidas a rozamientos y a otras causas, que en todas las transmisiones se producen.

Este gran par en las ruedas necesita encontrar un punto de apoyo para impulsar el tractor, y este punto de apoyo lo tiene que proporcionar el suelo.

Recordando el concepto de par (fuerza por distancia), para el par de 5 400 daN.m (6 000 - 10% de pérdidas en la transmisión), en una rueda motriz de tractor con un radio de 0.80 metros, resulta, que, en las garras de las ruedas, aparece una fuerza tangencial, consecuencia del par, de $5\,400/0.80 = 6\,750$ daN (aproximadamente 6 750 kg-fuerza) que el suelo debe resistir, para permitir el avance del tractor.

Cuando esto sucede, el tractor podrá 'tirar' con esta fuerza del apero que se le enganche detrás, descontando previamente la parte necesaria para vencer la resistencia a la rodadura, que siempre opone el terreno a su paso, y que se debe calcular para poder evaluar de una forma suficientemente aproximada la capacidad de tracción del tractor considerado.

Oposición del suelo al avance del tractor

La resistencia a la rodadura del tractor en el suelo está en función del



hundimiento y de la deformación de las ruedas al desplazarse sobre él. Se sabe que, cuando hay que empujar un remolque desenganchado, en un suelo duro (hormigón) éste se mueve con facilidad, pero en un barbecho, con las ruedas clavadas, la cosa no resulta tan sencilla.

En la tabla 1 se dan algunos valores del coeficiente que relaciona la fuerza necesaria para vencer la resistencia que opone el suelo a la rodadura en función del peso del tractor (coeficiente de rodadura).

Cuanto menor sea el peso del tractor, menos se perderá por rodadura, por lo que se aconseja en las labores ligeras (poco esfuerzo de tracción) quitar el lastre del tractor para que su peso quede reducido al mínimo posible.

TABLA 1.- VALORES DEL COEFICIENTE DE RODADURA PARA DIFERENTES SUELOS.

Naturaleza y Estado del suelo	Índice de cono (CI) [kPa]	Coefficiente de resistencia a la rodadura (2)
Carretera en buen estado	-	0.02 a 0.04
Camino de tierra afirmado	-	0.03 a 0.05
Camino de tierra	-	0.04 a 0.06
Suelo baldío	1800	0.06 a 0.10
Rastrojo seco	1200	0.08 a 0.10
Tierra labrada	900	0.10 a 0.20
Arena y suelo muy suelto	450 - 250	0.15 a 0.30

- (1) El índice de cono (CI) permite evaluar la consistencia de cada tipo de suelo de manera cuantitativa.
- (2) La resistencia a la rodadura se obtiene multiplicando el peso del vehículo por el valor del coeficiente correspondiente al suelo por el que se circula.

En labores pesadas, que requieren un gran esfuerzo de tiro, la disminución de peso del tractor hace aumentar considerablemente el patinamiento de

las ruedas, por lo que hay que estudiar con detenimiento cuál debe ser, en cada momento, el peso total (peso + carga dinámica + lastre) que debería de tener el tractor para conseguir una buena eficiencia en tracción

Apoyarse en el suelo

El suelo, además de soportar la carga vertical que genera el paso de cualquier vehículo, es el punto de apoyo de la fuerza tangencial que el par en la rueda produce a través de las garras del neumático, y si este punto de apoyo soporta la carga deformándose dentro de unos límites razonables, el tractor avanzará, pero si se rompe, el patinamiento o deslizamiento hará que el avance del vehículo sea cada vez menor, pudiendo llegar a detenerse, y las ruedas, al seguir girando, no harán más que abrir un hoyo en el suelo, en el que quedará sepultado el tractor.

Conviene, por tanto, relacionar la fuerza tangencial que soporta el suelo con el deslizamiento que entre rueda y suelo se produce en ese momento, que, asimismo, depende de la carga vertical que actúa sobre las ruedas motrices, debida a la masa del tractor y a las transferencias de carga que pueden comunicar los aperos que arrastra.

Para cualquier suelo se puede escribir que entre la fuerza horizontal que ejerce la rueda y la carga vertical sobre la misma (peso adherente) existe la relación:

$$\text{Fuerza} / \text{Peso adherente} = \text{Coeficiente de adherencia}$$





El coeficiente de adherencia depende del tipo de suelo; unos valores de referencia para el mismo se presentan en la tabla 2.

Pero el suelo no siempre es capaz de soportar la carga vertical que se necesita para poder utilizar el par motor que llega a las ruedas, y otras veces, aunque esté dentro de unos límites soportables, la eficiencia de tracción queda reducida considerablemente.

La mayor eficiencia en tracción se consigue limitando el deslizamiento voluntariamente, aceptándose como referencia, en función de estado del suelo, sobre la base de tractores de simple tracción, o con la tracción delantera desconectada, los siguientes valores:

- Suelo pavimentado 4 - 8%
- Suelo firme 8 - 10%
- Suelo labrado 11 - 13%
- Suelo blando y arena 14 - 16%

El aumento de fuerza horizontal que aplican las ruedas motrices en el suelo, para el mismo peso adherente, hace aumentar el patinamiento. La pér-

didada de velocidad del vehículo lleva a un mal rendimiento en el balance global de la transformación de la potencia del motor en potencia de tracción.

LIMITACIÓN PARA LAS MARCHAS CORTAS

Cuando un tractor utiliza marchas relativamente cortas (velocidades de avance de menos de 4 km/h o algo superiores), aparecen limitaciones importantes para poder utilizar toda la potencia disponible en el motor.

Así, un tractor de simple tracción, con 8-90 CV de potencia en el motor, en una relación del cambio que proporcione una reducción de 200 a 1, para que el suelo (rastrojo seco, por ejemplo, con un coeficiente de adherencia de 0.6) sea capaz de aguantar los 6 750 daN de fuerza tangencial, realizado por el conjunto de las ruedas motrices, y considerando que se trata de un tractor de simple tracción, tendría que cargar sobre el eje trasero:

$$6\ 750 / 0.60 = 11\ 250\ \text{daN}$$

Lo que significa disponer de un tractor con una carga dinámica sobre el conjunto de las ruedas motrices (masa + lastre + transferencia de carga inducida por el apero) de más de 11 toneladas, que para un tractor de simple tracción supondría una masa total de unas 13 toneladas

Esta masa total no es habitual para esta categoría de tractores (80-90 CV de potencia en el motor), por lo que se puede decir que, en las marchas más cortas, un tractor de estas características nunca será capaz de desarrollar toda la fuerza (par) que puede ofrecer su motor, por carecer de peso suficiente para ello.

Si la masa del tractor se incrementa con lastre suficiente para conseguirlo, las pérdidas por rodadura serán muy elevadas, por lo que sólo resulta aconsejable utilizar las marchas más cortas como velocidades lentas en labores que lo requieren, pero sin que en ellas se pueda desarrollar la potencia total del motor. Como consecuencia, las transmisiones no están calculadas para poder soportar, de manera continuada, los esfuerzos que generan los grandes pares que se producen con las marchas más cortas.

En una primera aproximación se puede decir que sólo del 50 al 60% del peso de un tractor puede transformarse en tracción, o sea que un tractor de 3 000 kg sólo podrá tirar con 1 800 kg-fuerza (aproximadamente 1 800 daN) cualquiera que sea la potencia de su motor.

TABLA 2.- VALORES DEL COEFICIENTE DE ADHERENCIA PARA DIFERENTES SUELOS.

Naturaleza y estado del suelo	Indice de cono (CI) [kPa]	Coefficiente de adherencia
Rastrojo seco	1200	0.60
Tierra labrada seca	900	0.57
Tierra labrada húmeda	450	0.52
Suelo suelto	250	0.48

UN CASO PRÁCTICO

Apliquemos estos planteamientos para analizar, de manera aproximada, lo que sucede en un tractor de simple tracción con 80-90 CV de potencia de motor.

PÉRDIDAS POR RODADURA

Para que el tractor avance, en primer lugar, debe de vencer la resistencia que opone el suelo. Considerando un tractor con 4 000 kg de carga vertical sobre el eje trasero, el peso total, si se trata de un tractor de simple tracción, deberá de ser de alrededor de los 4 800, para que en el eje delantero quede peso suficiente para controlar la dirección del tractor (15 a 20% de la masa total del tractor sobre el eje delantero en situación dinámica). La fuerza perdida por 'rodadura', será función del peso total del tractor.

En estas condiciones, para un coeficiente de resistencia a la rodadura igual a 0.09 (rastrojo), las pérdidas por rodadura serán de $4\ 800 \times 0.09 = 432$ daN, debidas al desplazamiento del tractor.

VELOCIDAD REAL DE AVANCE

Por otra parte, las ruedas del tractor giran a la velocidad que permite el régimen del motor en combinación con la relación del cambio que se ha seleccionado.

Así, para una marcha intermedia, como la que habitualmente se utiliza en labores de arada, en la que la relación de transmisión sea de 80 vueltas del motor por cada vuelta de la rueda motriz, para 2 000 rev/min de régimen nominal del motor, la rueda girará a $2\ 000/80 = 25$ rev/min.

Suponiendo que el radio de las ruedas motrices es de 0.80 m, la longitud recorrida por cada vuelta será: $2 \times 3.14 \times 0.80 = 5.02$ metros y en un minuto se recorrerán $5.02 \times 25 = 125.5$ m, lo que equivale a 2.09 m/s (7.53 km/h) de velocidad teórica de avance del tractor.

ESFUERZO DE TRACCIÓN

Si para esa misma velocidad del motor se calcula la fuerza tangencial que se produciría en las ruedas se tendrá:



par en las ruedas = 30 daN.m (par en el motor) $\times 80$ (relación de transmisión) = 2400 daN.m,

que con 10% de pérdidas en la transmisión se reducirá hasta $2\ 400 \times 0.9 = 2\ 160$ daN.m (aproximadamente $2\ 160$ kg.m).

Considerando el radio de las ruedas de 0.8 m la fuerza tangencial supondría $2.160 / 0.80 = 2\ 700$ daN

Si se trabaja en rastrojo se debería de procurar que la carga dinámica (en movimiento) sobre el eje trasero del tractor fuese de $2\ 700 / 0.6 = 4\ 500$ kg, si se desea que no rebase el patinamiento conveniente, que podemos estimar que estará alrededor del 15% para este caso, contando con que la masa total del tractor es de 4 800 kg.

POTENCIA DISPONIBLE PARA TIRAR DEL APERO

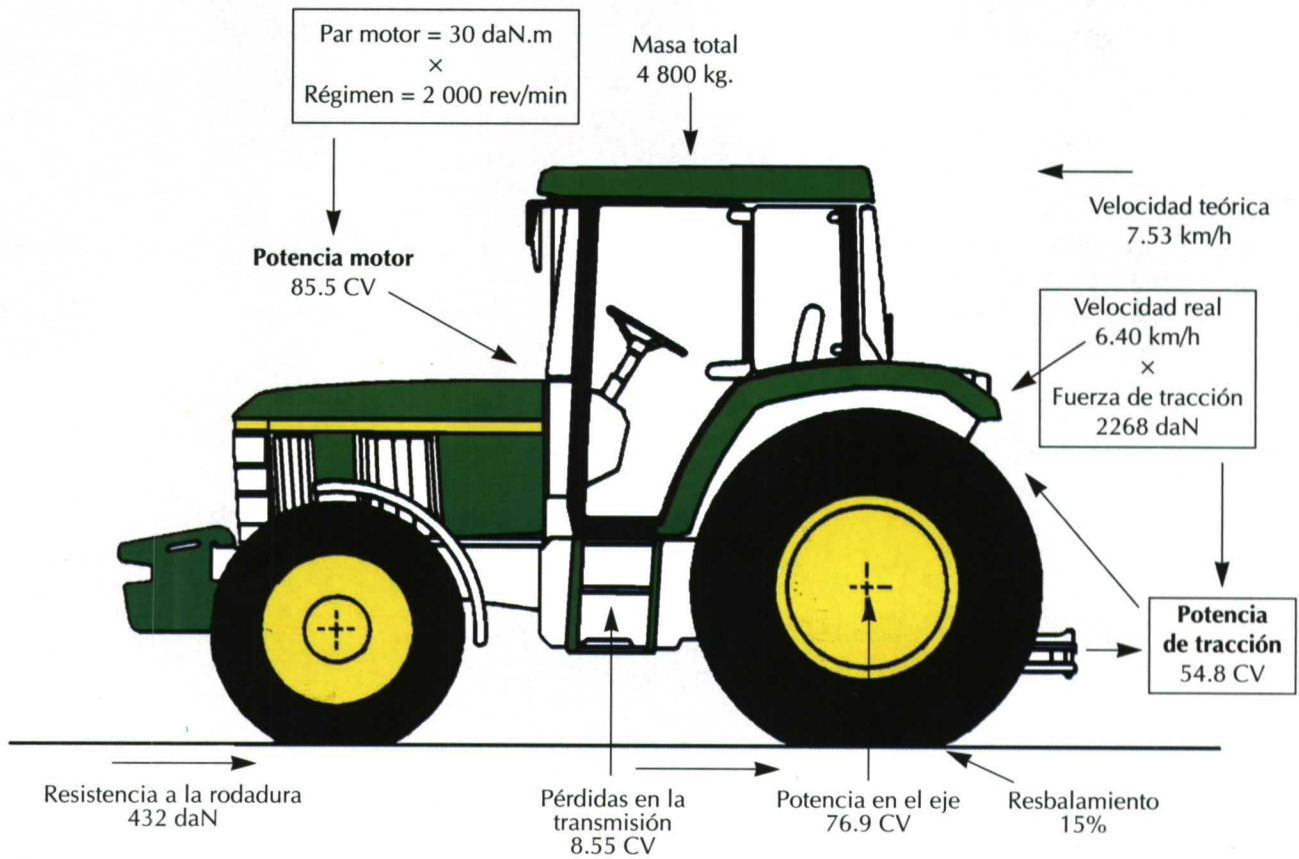
Por otra parte, si suponemos que la masa total del tractor, incluida la transferencia que puede inducir el esfuerzo de tracción que se está realizando, sigue siendo 4 800 kg, habrá que descontar los 432 daN que se perderán en la rodadura, sólo quedarán $2\ 700 - 432 = 2\ 268$ daN, para fuerza de tracción.

Suponiendo un patinamiento del 15%, la velocidad teórica de 2.09 m/s se reducirá en $2.09 \times 15 / 100 = 0.31$ m/s, dando una velocidad real de avance de 1.78 m/s (6.40 km/h).

Con estos cálculos la potencia que el tractor puede desarrollar a la barra será:

$$\begin{aligned} \text{Potencia a la barra} &= \\ &= \text{Fuerza de tiro} \times \text{velocidad real} = \\ &= 2\ 268 \text{ [kg]} \times 1.78 \text{ [m/s]} / 73.6 \text{ (factor de unidades)} = \\ &= 54.8 \text{ CV (40.4 kW)} \end{aligned}$$

BALANCE DE POTENCIAS EN UN TRACTOR DE SIMPLE TRACCIÓN



- La eficiencia total en la transformación de la potencia del motor cuando se convierte en potencia de tracción se calcula dividiendo la potencia de tracción por la potencia del motor ($54.8 / 85.5 = 0.64$). esto significa que, para este caso práctico, sólo el 64% de la potencia que está suministrando el motor se convierte en potencia de tracción.

- También se utiliza como indicador la que se conoce como Eficiencia de Tracción (TE), calculada como cociente entre la potencia de tracción y la potencia que llega al eje de las ruedas motrices ($54.8 / 76.9 = 0.71$). Es equivalente a la eficiencia total sin considerar las pérdidas en la transmisión entre motor y eje de las ruedas motrices, por lo que sólo se están valorando las pérdidas debidas a la rodadura y al patinamiento.

(en el caso de que la fuerza de tiro estuviera expresada en kg-fuerza, el factor de unidades sería 75).

Si se compara con la que en ese momento produce el motor:

$$\text{Potencia del motor} = \text{Par motor [m.kg]} \times \text{régimen de giro [rev/min]} / 716.2$$

O bien, la equivalente:

$$\text{Potencia del motor} = \text{Par motor [daN.m]} \times \text{régimen de giro [rev/min]} / 701.9$$

$$\text{La potencia del motor para el caso práctico sería:} \\ = 30 \text{ [daN.m]} \times 2\,000 \text{ [rev/min]} / 701.9 = 85.5 \text{ CV (62.9 kW)}$$

Se ve que se han perdido en la transformación 30.7 CV (22.5 kW), o sea el 35.8% de la potencia del motor.

Esto resulta equivalente a indicar que la eficiencia total de tracción (incluidas la pérdidas en la transmisión del tractor), calculada como cociente entre la potencia de tracción y la potencia del motor es de $54.8 / 85.5 = 0.64$.

Como no es aconsejable hacer trabajar el motor, de forma continua, a su potencia máxima, puede decirse que menos del 50 por 100 de la potencia efectiva máxima del motor es utilizable como potencia a la barra o de tracción, cuando éste se mueve sobre el suelo agrícola.

De aquí la decepción del usuario, que todavía aumenta cuando utiliza el tractor en marchas cortas sin incorporar suficiente lastre de acuerdo con el tiro que pretende realizar.

CONCLUSIONES PRÁCTICAS

Los cálculos realizados sobre tractores de simple tracción (2RM) han puesto de manifiesto que la potencia a la barra o potencia de tracción depende no sólo de la potencia disponible en el motor del tractor, sino que, en una gran medida, está condicionada por el lastre utilizado y, sobre todo, por la adecuación de los neumáticos al tipo de suelo en el que se tiene que trabajar.

En el caso de los tractores de doble tracción, tanto con ruedas iguales como desiguales, los cálculos son más complejos, ya que se produce una interferencia entre las ruedas de cada eje que cambian permanentemente sus radios dinámicos en función de las condiciones de trabajo, por lo que hay que incluir en los cálculos el 'avance cinemático' del eje delantero respecto al trasero.

Sin tener que profundizar en la dinámica de los tractores de doble tracción, se pueden dar unos valores prácticos que permitan al usuario conocer la potencia a la barra que tendrá disponible en un determinado tractor.



Para ello se recomienda utilizar como referencia la norma ASAE D497.4, de enero de 1998, que proporciona los factores de cálculo, dependiendo del estado del suelo y del tipo de tractor, los cuales se presentan en la tabla 3.

Esto significa que un tractor del tipo 'doble tracción', con ruedas de diferentes diámetros en cada eje (tractor tipo 2RM+TDA - dos ruedas

motrices y tracción delantera auxiliar), con 100 CV de potencia medida en la toma de fuerza, podrá proporcionar 87 CV de potencia de tracción en suelo pavimentado, 77 en suelo firme, 73 en suelo labrado y 65 en suelo blando, sobre la base de utilizar toda la potencia disponible en el motor, en condiciones atmosféricas similares a las que había en el momento de realizar el ensayo de la potencia a la toma de fuerza. Un tractor de 100 CV, tipo simple tracción, en suelo labrado, sólo podría proporcionar 67 CV de potencia de tracción.

Por otra parte, hay que señalar que los valores que se obtienen utilizando los coeficientes indicados hay que considerarlos como potencialmente posibles, siempre que el tractor se encuentre adecuadamente lastrado y con neumáticos apropiados, siguiendo las recomendaciones del fabricante

Se desperdician 10 ó 15 CV con un mal lastrado, o utilizando una presión de inflado de los neumáticos alta o excesivamente baja para las condiciones del suelo, mientras se discute por un CV en la potencia de homologación. ♠

TABLA 3.- FACTORES QUE PERMITEN CALCULAR LA POTENCIA TRACCIÓN QUE SE PUEDE CONSEGUIR EN UN TRACTOR AGRÍCOLA, A PARTIR DE LA POTENCIA MEDIDA EN LA TOMA DE FUERZA

Tipo de tractor	Pavimento	Suelo firme	Suelo labrado	Suelo blando
Simple tracción (2RM)	0.87	0.72	0.67	0.55
Doble tracción, con ruedas desiguales (2RM+TDA)	0.87	0.77	0.73	0.65
Doble tracción, con ruedas iguales (4RM)	0.87	0.78	0.75	0.70
Cadenas	0.88	0.82	0.80	0.78

Nota: En el caso de disponer de la potencia medida en el motor, para calcular la potencia en la toma de fuerza, hay que utilizar un factor de corrección complementario que varía entre 0.95 y 0.88 según el tipo de transmisión (Ver: *agrotécnica*, abril de 1998)