

LOS NEUMÁTICOS Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA



Neumático PneuTrac, prototipo desarrollado por Mitas.

Quando se discute sobre la eficiencia energética de los tractores solo se suele mirar a la de sus motores, olvidando que las mayores pérdidas se producen cuando la potencia del motor se convierte en potencia de tracción.

LUIS MÁRQUEZ

Así, con tractores de doble tracción y ruedas delanteras de menor diámetro que las traseras (tipo 2+2 RM), en un suelo firme y haciéndolo bien, solo un 77% de la potencia de su motor se convierte en potencia de tracción, lo que equivale a decir que se ha perdido el 33% de la que suministra el motor. Cuando el suelo es blando, solo se puede aprovechar el 65% de la misma. En uno y otro caso, para conseguir la máxima eficiencia en tracción, resulta esencial que la tractor tenga un peso adecuado en función de la potencia en su motor, y que los neumáticos lo soporten, minimizando su resistencia al avance (rodadura) y con reducido patinamiento.

■ El peso del tractor

Para poder utilizar la potencia que proporciona el motor de un tractor en tracción se necesita que el peso del mismo sea el adecuado, ya que si es escaso se produce un aumento del patinamiento,

mientras que si resulta excesivo una parte de la potencia se pierde para que los neumáticos rueden.

El par motor que llega a las ruedas hace que se genere una fuerza tangencial sobre el suelo. La relación entre la fuerza tangencial que el suelo puede soportar y la carga vertical sobre la rueda se conoce como coeficiente de adherencia. En cualquier condición la rueda al girar recorre un camino que siempre es inferior a su circunferencia de rodadura; esta pérdida de recorrido se cuantifica mediante el coeficiente de patinamiento o deslizamiento.

No se debe olvidar que a medida que aumenta el deslizamiento la velocidad real del tractor se reduce, y con ello su capacidad de trabajo, con lo que se pierde eficiencia energética.

Para un tractor que trabaje en un suelo agrícola blando, con un coeficiente de adherencia del 60% (fuerza tangencial de la rueda del 60% de la masa que carga sobre ella para que el patinamiento se mantenga alrededor del 10%), la relación entre la potencia del motor utilizada en tracción y la carga sobre las ruedas motrices se puede calcular, en una primera aproximación, con la expresión matemática:

$$P \text{ [kg]} = N \text{ [CV]} \times f_{ut} \times \eta_t \times 270 / (f_{RM} \times \mu \times v_t \text{ [km/h]})$$

Siendo:

P = masa total del tractor

N = potencia máxima del motor

f_{ut} = factor de utilización del motor (se considera el 75% de la potencia máxima)

η_t = eficiencia en la transmisión (0.9)

270 = factor de unidades

f_{RM} = factor RM (valor 1.0 en tractores 2+2RM y 4RM y 0.85 en los de 2RM)

v_t = velocidad teórica (no tiene en cuenta el patinamiento)

μ = coeficiente de adherencia (0.6 en suelo de rastrojo húmedo)

Esta expresión se puede simplificar estableciendo una relación peso/potencia con la velocidad teórica de avance:

$$P \text{ [kg]} / N \text{ [CV]} = \text{Cte.} / \mu \times v_t \text{ [km/h]}$$

Utilizando como referencia el 75% de la potencia máxima del motor para un tractor que trabaje en suelo agrícola blando, la relación P/N (kg/CV) necesaria en función de la velocidad a la que se va a trabajar queda reflejada en el Gráfico 1.

Esto significa que para trabajar en tracción a 7.5 km/h, utilizando el 75% de la potencia del motor, la relación P/N sería de unos 43 kg/CV, por lo que un tractor de 150 CV debería disponer de una masa total de 6 450 kg (masa en vacío + lastre).

Utilizando la información que proporcionan los ensayos OCDE (años 2011-2013) de tractores que se comercializan en Europa, para potencias entre 75 y 160 kW (102 y 218 CV), se ha elaborado el Gráfico 2, en el que se puede observar que la relación peso/potencia, tomando como referencia la masa utilizada para el ensayo de tracción en pista (si lastre), se mantiene en el intervalo de los 40 a 50 kg/CV.

Siempre que se realizan trabajos de tracción en suelo agrícola, utilizando el 75% de la potencia máxima del motor, a una velocidad igual o superior a que corresponde a la relación peso/potencia (Gráfico 1), no es necesario lastre complementario; por debajo de esta velocidad sería necesario utilizarlo.

■ Los neumáticos y la presión de inflado

El peso del tractor se transmite al suelo mediante los neumáticos, que, además, deben soportar el par de torsión que le proporciona su eje motor.

A este respecto, las leyes de la Física se cumplen siempre: a medida que aumenta la carga sobre el neumático lo hace la superficie de apoyo

GRÁFICO 1.- RELACIÓN PESO/POTENCIA CON LA VELOCIDAD TEÓRICA

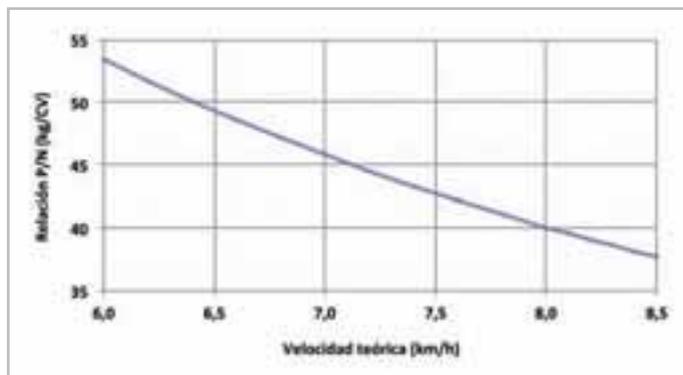
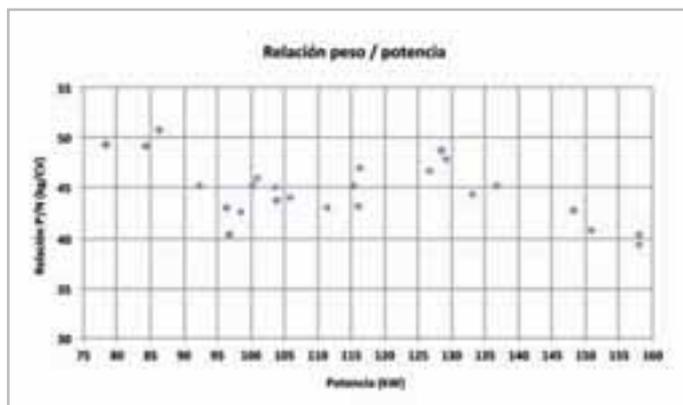


GRÁFICO 2.- TRACTORES CON ENSAYOS OCDE (2011-2013)

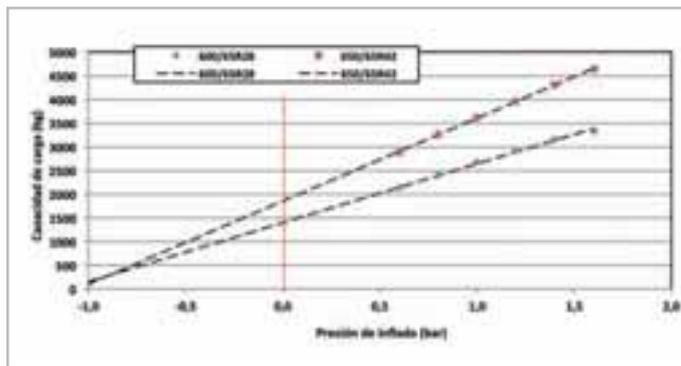


en el suelo, si se mantiene constante la presión de inflado. La presión sobre el suelo, con independencia de la carga sobre la rueda, es igual a la presión de inflado incrementada como consecuencia de la resistencia que opone la cubierta a deformarse. O sea, una rueda de 'baja presión' solo lo será si se mantiene baja la presión de inflado; para ello el neumático debe permitirlo sin salirse de la llanta o deteriorarse. Con mayor anchura del balón de la cubierta y del diámetro de la misma se consigue aumentar la superficie de apoyo de la rueda en el suelo.

La capacidad de carga del neumático varía linealmente con la presión de inflado, como se aprecia en el Gráfico 3 elaborado con ruedas de dimensiones 600/65R28 y 650/65R42. Se observa que la variación de la capacidad de carga sigue una línea de tendencia que corta al eje de presiones al nivel de la presión ficticia de -1.0 bar, por lo que, a partir de la capacidad de carga nominal, se puede calcular la capacidad de carga, a cualquiera de las presiones de inflado en el rango admitido por el neumático, utilizando la expresión matemática:

$$C_{pi} = C_{max} \times (p_i + 1) / (p_{max} + 1) = C_{max} \times f_{pi}$$

GRÁFICO 3.- VARIACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CARGA CON LA PRESIÓN DE INFLADO



Neumáticos Continental AC65.

Siendo:

C_{pi} = capacidad de carga a la presión de inflado p_i

C_{max} = capacidad de carga a la presión de inflado nominal.

p_i = presión de inflado utilizada en campo

p_{max} = presión de inflado nominal (normalmente de 1.6 bar en neumáticos para tractor)

f_{pi} = factor de presión de inflado

Considerando una presión adecuada para trabajar en campo de 0.9 bar, el factor de presión de inflado será:

$$\text{Factor de presión } (f_{pi}) = (p_i + 1) / (p_{max} + 1) = (0.9 + 1) / (1.6 + 1) = 0.731$$

Si se necesita un neumático trasero con capacidad en carga durante el trabajo en campo de 2 000 kg a una presión de inflado de 0.9 bar, la capacidad de carga nominal del neumático elegido tendrá que ser de $2\,000 / 0.731 = 2\,736$ kg (a 1.6 bar de presión)

En la Tabla 1 se presentan los valores de los factores de presión para las diferentes presiones de inflado con respecto a la presión de inflado nominal de 1.6 bar.

Criterios para el dimensionamiento de los neumáticos del tractor

Los neumáticos radiales con la marcación métrica, ampliamente difundidos en los países

de la UE, se designan utilizando como referencia la anchura del balón expresada en mm, la relación entre la altura del balón y su anchura en porcentaje y el diámetro de la llanta en pulgadas. Así, un neumático de estructura radial designado como 600/65R28 tiene una anchura nominal de 600 mm, su relación de perfil es del 65% y va montado sobre una llanta de 28 pulgadas.

Si uno accede a la información técnica que suministra el fabricante se observa que la designación se complementa con otros valores como son:

600/65 R 28 150 A8; llanta utilizada W 18L

Anchura efectiva	Diámetro exterior	Radio estático	Circunferencia de rodadura	Radio índice
590	1 485	661	4 411	700

El valor 150 es un índice tabulado que define la capacidad de carga del neumático para una determinada velocidad de máxima. El índice de carga de 150 equivale a una capacidad de carga de 3 350 kg con una presión de inflado de 1.6 bar, a una velocidad de máxima de 40 km/h (A8). Cuando se trabaja a baja presión de inflado para reducir la compactación del suelo, la capacidad



Banco de pruebas de vibraciones de la empresa BKT.

TABLA 1.- FACTORES DE PRESIÓN POR LOS QUE HAY QUE DIVIDIR LA CAPACIDAD DE CARGA DEL NEUMÁTICO CUANDO CAMBIA LA PRESIÓN DE INFLADO (bar)

Presión de inflado (p_i)	$p_{0.6}$	$p_{0.8}$	$p_{0.9}$	$p_{1.0}$	$p_{1.1}$	$p_{1.2}$	$p_{1.4}$
Factor de presión (f_{pi})	0.615	0.692	0.731	0.769	0.808	0.885	0.923

de carga se reduce como se indica en el apartado anterior. El radio índice es el que se utiliza como referencia para calcular la velocidad máxima del tractor (si patinamiento) en su homologación de tipo CE.

Las dimensiones de los neumáticos deben ser las apropiadas para soportar la carga que sobre ellas ofrece el tractor en su movimiento. Como las cargas verticales que actúan sobre las ruedas de los ejes delantero y trasero no permanecen constantes, sino que se producen transferencias de carga entre los ejes en función del esfuerzo de tracción que se realiza, se estima que los neumáticos del eje delantero (en tractores del tipo 2+2RM) deben tener una capacidad de carga del 50% de la masa de referencia del tractor, mientras que los del eje trasero del 80% de esta masa de referencia.

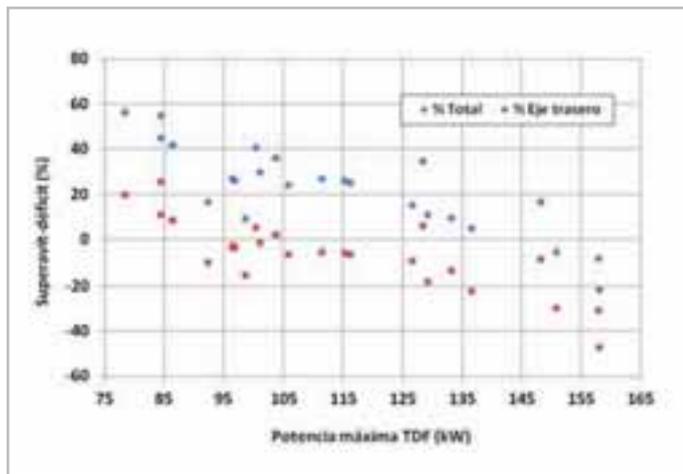
Esto indica que los neumáticos deben tener una capacidad de carga en su conjunto igual al 130% de la masa de referencia del tractor, en las condiciones de inflado aconsejables para el trabajo de campo (baja presión).

En consecuencia, un tractor de 100 CV (73.5 kW) de potencia máxima con una relación peso/potencia de 45 kg/CV necesitaría unos neumáticos con una capacidad de carga total de $4\,500 \times 1.3 = 5\,850$ kg. La capacidad de carga en cada una de las ruedas del eje delantero sería de $4\,500/4 = 1\,125$ kg y las del eje trasero $4\,500 \times 0.8 / 2 = 1\,800$ kg, en el supuesto de que estuvieran infladas a la presión de 1.6 bar, que es la que se toma como referencia para establecer la capacidad de carga nominal de los neumáticos en los tractores agrícolas. Si se quiere trabajar con menor presión de inflado, que es lo recomendable, al menos en las ruedas del eje trasero, para reducir la compactación de suelo, la capacidad de carga necesaria habrá que calcularla dividiendo el valor obtenido (1 800 kg) por el factor de presión indicado en la Tabla 1. Así para 0.8 bar de presión de trabajo sería $1\,800/0.692 = 2\,601$ kg. Utilizando la tabla que se encuentra en cualquier catálogo de neumáticos esto equivale a elegir un neumático con Índice de Carga de 141-142 para velocidad máxima de 40 km/h (A8).

■ Lo que ofrece el mercado de tractores

Los fabricantes de tractores ofrecen la posibilidad de que el usuario elija el neumático que mejor se adapta a sus necesidades, dentro de una gama restringida en función de lo que considera que permitiría conseguir la máxima eficiencia en tracción para las condiciones habituales de utilización. Entre todos los recomendados se suele fijar el de dimensión 'estándar' que va asociada al precio de venta de la unidad.

GRÁFICO 4.- CAPACIDAD DE CARGA DE LOS NEUMÁTICOS PARA 49 kg/CV Y 90% DE LA POTENCIA MÁXIMA (%)



Cuando el tractor se somete a ensayos según el Código 'reducido' de la OCDE, en el que se realiza un ensayo de tracción sin lastre sobre pista de hormigón, la unidad ensayada incorpora unos neumáticos con dimensiones que pueden servir de referencia para realizar una comparación entre los diferentes modelos comerciales, utilizando la metodología anteriormente desarrollada.

Utilizando los ensayos realizados en los laboratorios europeos de la OCDE sobre tractores que se comercializan en Europa (35 modelos de diferentes marcas con potencias comprendidas entre 75 y 160 kW con los neumáticos que se indican en la Tabla 2) se puede calcular la capacidad total de carga de los neumáticos a una determinada presión de inflado y compararla con el peso de referencia del tractor en función de su potencia incrementado en un 30%, según se indicó anteriormente para adaptarse las transferencias de carga que se producen entre los ejes delantero y trasero.

Así:

$$P_{ref} \times 1.3 < C_{RD} \times 2 \times f_{pl_{RD}} + C_{RT} \times 2 \times f_{pl_{RT}}$$

Siendo:

P_{ref} = Peso de referencia estimado; igual a la potencia máxima del motor multiplicada por 0.9 y por factor peso/potencia (49 kg/CV)

C_{RD} = capacidad de carga a la presión de inflado nominal de las ruedas delanteras

C_{RT} = capacidad de carga a la presión de inflado nominal de las ruedas traseras

$f_{pl_{RD}}$ = factor de presión de inflado en ruedas delanteras

$f_{pl_{RT}}$ = factor de presión de inflado en ruedas traseras

TABLA 2.- DIMENSIONES DE LOS NEUMÁTICOS UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS OCDE PARA DIFERENTES MODELOS DE TRACTORES CON POTENCIAS ENTRE 75 Y 160 kW

Potencia máxima TDF (kW)	Ruedas delanteras			Ruedas traseras		
	Designación neumático	Índice carga	Capacidad carga (kg)	Designación neumático	Índice carga	Capacidad carga (kg)
78.3	480/65R28	136	2 240	600/65R38	153	3 650
78.3	480/65R28	136	2 240	600/65R38	153	3 650
78.3	480/65R28	136	2 240	600/65R38	153	3 650
84.3	480/65R28	136	2 240	600/65R38	153	3 650
84.3	480/65R28	136	2 240	650/65R38	157	4 125
86.3	480/65R28	136	2 240	600/65R38	153	3 650
86.3	480/65R28	136	2 240	600/65R38	153	3 650
92.3	380/85R28	131	1 950	460/85R38	149	3 250
96.4	480/65R28	136	2 240	600/65R38	153	3 650
96.4	480/65R28	136	2 240	600/65R38	153	3 650
96.8	480/65R28	136	2 240	600/65R38	153	3 650
96.8	480/65R28	136	2 240	600/65R38	153	3 650
98.6	380/85R28	131	1 950	460/85R38	149	3 250
100.4	540/65R28	142	2 650	650/65R38	157	4 125
101.1	420/85R28	139	2 430	520/85R38	155	3 875
103.7	540/65R28	142	2 650	650/65R38	157	4 125
103.8	540/65R28	142	2 650	650/65R38	157	4 125
103.8	540/65R28	142	2 650	650/65R38	157	4 125
105.8	420/85R28	139	2 430	520/85R38	155	3 875
111.4	540/65R28	142	2 650	650/65R38	157	4 125
115.3	540/65R30	143	2 725	650/65R42	158	4 250
116.1	540/65R30	143	2 725	650/65R42	158	4 250
116.2	540/65R30	143	2 725	650/65R42	158	4 250
126.7	480/70R30	141	2 575	620/70R42	166	4 500
128.4	600/65R28	147	3 075	710/70R38	166	5 300
128.4	600/65R28	147	3 075	710/70R38	166	5 300
129.2	540/65R30	143	2 725	650/65R38	157	4 125
133.2	480/70R30	141	2 575	620/70R42	166	4 500
136.6	540/65R30	143	2 725	650/65R38	157	4 125
148.2	600/65R28	147	3 075	710/70R38	166	5 300
148.2	600/65R28	147	3 075	710/70R38	166	5 300
150.9	540/65R30	143	2 725	650/65R38	157	4 125
157.9	540/65R30	143	2 725	650/65R42	158	4 250
158.1	480/70R30	141	2 575	460/85R38	149	3 250

Por otra parte, se puede verificar si la capacidad de carga de las ruedas traseras cumple la condición de ser igual o mayor que el 80% de la masa de referencia del tractor.

En Gráfico 4 se presentan los valores calculados para cada uno de los modelos del tractor expresados en porcentaje de los estimados como apropiados, considerando que la masa de referencia es igual al 90% de la potencia máxima del tractor multiplicada por una relación peso/potencia de 49 kg/CV (6.5 km/h de velocidad crítica sin patinamiento) y la capacidad de carga de los

neumáticos calculada con presiones de inflado de 0.8 bar en el eje trasero y 1.6 bar en el delantero.

En el mismo se puede observar que los tractores de menor potencia se utilizan unos neumáticos generosos, lo que no sucede en los de alta potencia, por lo que para aprovechar la potencia de sus motores en trabajos de tracción tendrían que trabajar mayor velocidad (con menor esfuerzo de tracción), utilizar una parte de la potencia disponible con la toma de fuerza, o aumentar la presión de inflado para incrementar la capacidad de carga de los neumáticos.

TABLA 3.- CÁLCULO DEL ADELANTO POR EL RECORRIDO DE LAS RUEDAS EN 10 VUELTAS

	Recorrido de 10 vueltas		Cálculos
	Rueda delantera	Rueda trasera	
En doble tracción	39.50 m	52.69 m	$a = 1.334 / 1.300 = 1.026$
En simple tracción	41.00 m	53.29 m	$RM = 52.69 / 39.50 = 1.334$
			$d_T / d_D = 53.29 / 41.00 = 1.300$

El adelanto real será:

$$a = RM / (d_{10T} / d_{10D})$$

FIGURA 1.- CÁLCULO DE LA RELACIÓN MECÁNICA Y DE LA RELACIÓN DE RADIOS



La compatibilidad entre ruedas delanteras y traseras

En los tractores de doble tracción con ruedas delanteras de menor tamaño, las dimensiones de los neumáticos delanteros están condicionadas por las de los traseros y por la relación mecánica (RM) de la transmisión al eje delantero.

La relación mecánica RM del tractor se encuentra en su Manual, pero también se puede calcular haciendo circular el tractor sobre suelo firme con la doble tracción conectada, y midiendo la distancia recorrida en 10 vueltas de una de las ruedas traseras y 10 vueltas de una de las delanteras. El cociente entre estos valores es igual a la RM.

La velocidad periférica de las ruedas del eje delantero suele ser algo superior a las del eje trasero; el 'adelanto' de estas ruedas se calcula dividiendo la relación mecánica (RM) entre ejes por la relación entre los radios dinámicos de ruedas traseras/ruedas delanteras [$a = RM / (r_T / r_D)$]; el 'anticipo' es el adelanto expresado en términos de porcentaje [$A = 100 \times (a - 1)$].

Se recomienda que el adelanto se encuentre entre 1 y 5%, con lo que se evita el excesivo desgaste de las ruedas y la tendencia a saltar de los tractores cuando trabajan en suelos duros.

En una primera aproximación se pueden utilizar el radio índice, o mejor el radio de la circunferencia de rodadura, para hacer estos cálculos.

Así, el radio de referencia de las ruedas del eje delantero debe ser igual al de las ruedas traseras

dividido por la relación mecánica (RM), incrementado en un porcentaje inferior al 5%, o sea:

$$r_{ref-D} = (1.00 \dots 1.05) \times (r_{ref-T} / RM)$$

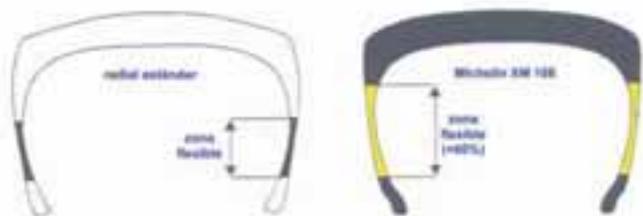
Hay que tener en cuenta que el radio índice no se corresponde con el radio dinámico del neumático, sino que es un valor de referencia utilizado para el cálculo de la velocidad máxima de circulación a efectos reglamentarios.

Aparecen diferencias en los radios dinámicos según el origen del neumático (marca, modelo), por lo que al cambiar de marca, incluso si se utiliza las mismas dimensiones, hay que comprobar que los valores son aceptables. La mejor opción es utilizar el radio dinámico, si aparece en las tablas de neumáticos, o la circunferencia de rodadura para calcular un radio equivalente (longitud de la circunferencia de rodadura = $2\pi r_{din}$). Modificando ligeramente las presiones de inflado se consigue un ajuste apropiado de las velocidades periféricas de las ruedas.

Para comprobar que el adelanto es el adecuado, una vez montados los neumáticos en el tractor, se pueden medir las distancias recorridas en 10 vueltas de una de las ruedas delanteras y en 10 vueltas de una de las traseras con la doble tracción desconectada.

En la Tabla 3 se presenta el cálculo de la relación mecánica (RM) y del adelanto (a) para un tractor de doble tracción con ruedas desiguales, aplicando la metodología indicada. El valor obtenido para la relación mecánica es de 1.334, para el adelanto 1.026 y para el anticipo 2.6%.

FIGURA 2.- AUMENTO DE LA LONGITUD DE LA ZONA FLEXIBLE EN EL FLANCO DEL NEUMÁTICO



La evolución de los neumáticos

Todos los fabricantes han desarrollado neumáticos radiales específicos para la agricultura. Se ha incrementado la anchura de apoyo, fabricando neumáticos de bajo perfil, a la vez que aumentan la flexibilidad de los flancos para reducir la resistencia a la rodadura, especialmente en suelos duros y pavimentos, que pueden trabajar a baja presión sin riesgo de que la cubierta deslice sobre la llanta.

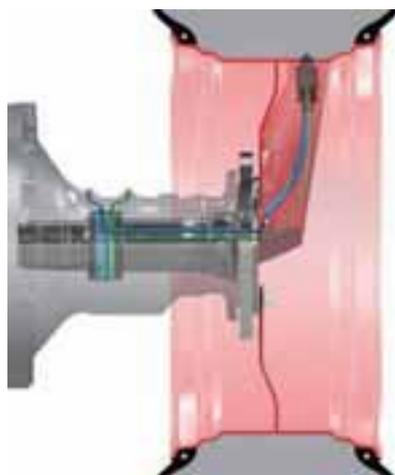
La eficiencia del neumático está condicionada por el patinamiento, por lo que el aumento de la superficie de apoyo permite incrementar la capacidad de tracción para el mismo nivel de patinamiento.

Considerando que el neumático trabaja sobre suelo agrícola, resulta muy importante el diseño de las garras que penetran en el suelo. La máxima eficiencia se consigue con una altura de garras que penetren completamente en el suelo. Esto significa que en un suelo pavimentado la mejor opción sería un neumático agrícola con garras desgastadas. A medida que el suelo se hace más blando conviene aumentar la altura de las garras.

Esto hace que los fabricantes ofrezcan neumáticos con distintos perfiles en la capa de rodadura.

Además, hay que tener en cuenta el diseño de la garra para que se limpie cuando deje el suelo, ya que en caso contrario la garra se quedaría en la superficie cuando de nuevo vuelva al suelo, con la consiguiente reducción de la capacidad de tracción, al no llegar a las capas del suelo con mayor consistencia.

FIGURA 3.- SISTEMA VARIOGRIP PARA LA REGULACIÓN DE LA PRESIÓN DE INFLADO DE LOS NEUMÁTICOS (FENDT)



Otro punto importante son las vibraciones que producen los tacos al circular sobre pavimento y el ruido en los oídos del conductor, que se puede minimizar en un tractor cuando circula a alta velocidad por una carretera pavimentada, utilizando las mejoras en el diseño de los neumáticos.

Un punto crítico es la flexibilidad de los flancos del neumático, que al aumentar permite reducir la resistencia a la rodadura, ya que es menor el consumo de energía en la deformación y posterior vuelta a la posición normal que se produce durante la rotación de la rueda.

A este respecto los fabricantes de neumáticos ofrecen un aumento de la altura de la parte más flexible en el costado del neumático con más del 60% respecto a un radial convencional. Esto se puede conseguir sobre la base de utilizar materiales que aumenten la flexibilidad del flanco a la vez que su resistencia, lo que hace posible que la deformación por aumento de la carga no afecte a la zona de rodadura. Es imprescindible eliminar la cámara, por lo que todos los neumáticos de diseño más reciente son del tipo 'sin cámara'.

Otra característica que ofrecen los nuevos diseños en algunas marcas es la posibilidad de trabajar con diferentes cargas sin modificar las presiones de inflado, aunque se advierte que la máxima eficiencia se consigue cuando la presión de inflado hace que la cubierta tome el perfil óptimo. Lógicamente, cuando aumenta la carga y se mantiene la presión de inflado se puede conseguir que se mantenga la anchura de la huella en el suelo, pero conviene recordar que la superficie de apoyo debe aumentar, lo que indica que la longitud del apoyo tiene que hacerlo.

Con la incorporación de nuevos materiales se consigue una cierta adaptación del neumático al trabajo cíclico campo-carretera sin tener que modificar la presión de inflado, pero conviene hacerlo para conseguir la mayor eficiencia energética, para lo cual se ofrecen soluciones para el cambio de la presión de inflado de los neumáticos incorporadas en los tractores, como la presentada recientemente por Fendt; puede ser una opción muy interesante para los tractores que cambian continuamente de la carretera al campo.

Si bien es cierto que no se pueden cambiar los neumáticos de los tractores en función del estado del suelo, como se hace en los automóviles de alta competición, al menos hay que aprovechar la posibilidad de cambiar la presión de inflado para mejorar la eficiencia energética.

En el número de **agrotécnica** de febrero de 2008 se encuentra una comparativa de neumáticos con el título: *Capacidad de tracción y confort de marcha*, que puede complementar el contenido de este artículo. ■