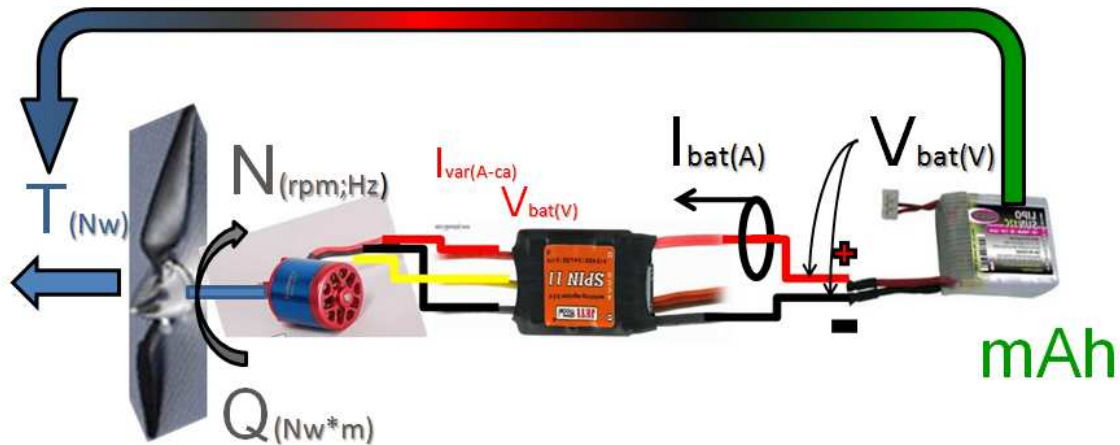


## LOS RENDIMIENTOS DEL TREN DE POTENCIA COMO PREDECIR EL COMPORTAMIENTO EN CONJUNTO, ELEGIR MOTOR Y HÉLICE. CÓMO MEJORAR LA TREPADA (Avanzado y1): El Variador y El Motor.

Este es un tren de potencia:



Si el lector no reconoce, la hélice, el motor brushless, el variador y la batería, es mejor que ya no siga leyendo, pero pocos lectores habrán llegado aquí en esas condiciones.

### PRIMERA CONVERSIÓN DE ENERGÍA: LA BATERÍA

La energía para la trepada es almacenada en la batería en forma química que a través de una reacción química reversible que genera la corriente para alimentar el tren de potencia.

Aquí las reinas son las baterías de POLÍMERO de LITIO (LIPO) se agrupan en series de elementos de la misma capacidad. El motivo de su aceptación para estas competiciones de veleros es su capacidad de almacenamiento de energía por unidad de masa, que es la más alta del mercado.

Una batería LIPO a plena carga entrega 4,2 Voltios y a punto de descargarse 3,7 Voltios (esta es la tensión nominal) a partir de ese momento la tensión cae muy rápidamente y si se opera por debajo de 3 V se corre el riesgo de dañarla casi seguro o sea que la batería ya no será la misma, o de llegar a quedarse inservible.

A altas corrientes de descarga esta tensión cae por la resistencia interna de los vasos/elementos de la batería y esa es la tensión que entrega al variador. Esta es la tensión que hay que vigilar para no dañar las baterías(no la de la batería descargada en reposo) NUNCA operar una batería por debajo de 3 V por elemento no me cansaré de repetirlo.

A lo largo de la competición la tensión en los bornes de la batería cae porque se descarga y por la caída de tensión en su resistencia interna.

En la conversión energética se disipa energía en forma de calor (la potencia que disipa en la resistencia interna), la batería se calienta y como tal se puede medir su rendimiento.

En la competición K4-K6 estas pérdidas de energía no son tan importantes en sí mismas, pero sí en tanto en cuanto hacen que la tensión en los bornes sea inferior a la nominal. Para el cómputo del tiempo se asume que la tensión de la batería es constante e igual a la nominal, lo que, por otra parte, es una hipótesis muy ajustada a la realidad.

Si tu batería está dando más voltios que 3,7 por vaso: MEJOR PARA TI.

Conclusión 1: Batería grande y buena (con muchos C's y de los de verdad) es mejor para tener mejores resultados en la trepada.

Claro que si la batería es muy grande pesará mucho y con ese peso hay que volar durante todo el vuelo planeado.

Primera Optimización de la misión: Hay que balancear el peso de la batería entre capacidad de ascenso y pérdida de performances de planeo.

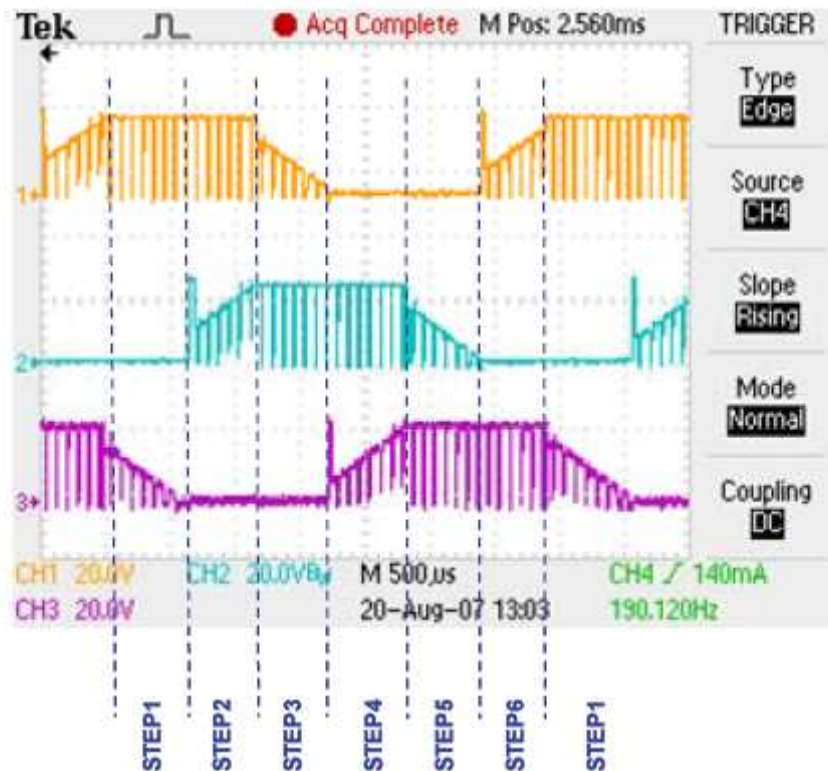
A la salida de la batería se miden los amperios de descarga a los 5 segundos de estar a máxima potencia, que es más o menos cuando la tensión en bornas y la corriente estabilizan desde los valores de reposo (en realidad siempre están bajando durante la trepada).

Con este presupuesto de energía por unidad de peso igual para todos (Tensión nominal\*Intensidad medida\*tiempo concedido) los participantes comienzan su trepada.

## SEGUNDA CONVERSIÓN DE ENERGÍA: EL VARIADOR-MOTOR

La corriente eléctrica continua que entrega la batería es modulada en corrientes de pulsos trifásicos a la velocidad de giro del motor: esta es la misión del variador.

El variador va conectando sucesivamente las bornas de la batería entre cada dos de los tres terminales del motor, positivo y negativo. Dando lugar a seis posibles configuraciones de alimentación, esta técnica de alimentación es conocida como control trapezoidal de las fases porque en vez de una tensión sinusoidal (como es la trifásica de verdad) se alimenta cada bobina con una tensión "parecida" a trapecios que varía entre las tensiones positiva y negativa de la baterías.



En esta figura se puede ver la tensión que en los tres bobinados a lo largo de una vuelta pasos 1 al 6 (se ven las conmutaciones del variador, que son los palitos verticales de por medio de la onda).

El tercer bobinado lo utiliza el variador para saber cuándo ha de hacer la próxima conmutación, técnica "sensorless", que depende de la velocidad de giro del eje del motor que también ha de medir el variador.

Para hacer estas tareas la corriente ha de pasar por ciertos circuitos en el variador que lógicamente generan ciertas pérdidas de tensión, en caso de un variador por MOSFET hay una caída correspondiente a varias miliohmios en el camino de ida y otras tantas en el camino de vuelta de la corriente. Por eso se calienta.

En resumen a través del variador hay que considerar como si una resistencia estuviera en serie,  $R_{var}$ . El valor de esta resistencia dependerá del modelo y tamaño de cada variador.

Una vez que el variador ha formateado la corriente, al motor-variador lo vamos a simular como uno de corriente continua.

Los parámetros que gobiernan el funcionamiento de cada motor brushless/de continua son:

$K_v$  se mide en rpm por voltio, así un motor de  $K_v = 1000 \text{ rpm/V}$  girará a unas 12.000 vueltas por minuto en vacío alimentado a 12 voltios.

(De hecho la manera apropiada de medir  $K_v$  es arrastrar el motor a unas revoluciones conocidas y medir la tensión que, como generador, entrega)

$I_0$  es la intensidad en vacío del motor, la intensidad que circula cuando el motor está sin carga, es bastante independiente de la tensión de alimentación.

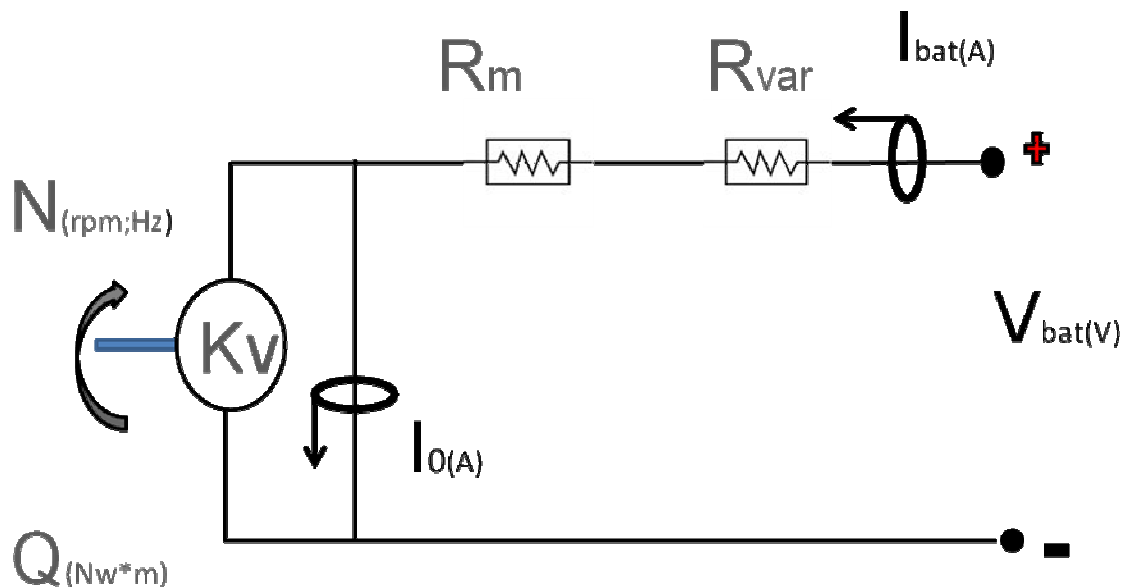
$R_m$  es la resistencia de los bobinados entre las bornes del motor.

Bien, si expresáramos  $K_v$  en el sistema internacional de medidas (en voltios por radianes por segundo y no en rpm por voltio) tendríamos  $K_E$ . (Nótese que aquí los voltios están en el numerador).

Pues mejor todavía: se demuestra que  $K_E = K_Q$ .  $K_Q$  es la relación entre el par motor y la intensidad consumida que se expresa de la siguiente forma.

[8]

$$Q(\text{Par}_{\text{motor}} \text{ } N^*m) = K_Q * (I_{\text{bat}} - I_0)$$



Con este circuito queda simplificada la parte eléctrica del tren de potencia.

La velocidad de giro la calcularemos como.

[9]

$$N(\text{rad}/\text{seg}) = \frac{1}{K_E} * (V_{\text{bat}} - I_{\text{bat}} * (R_m + R_{\text{var}}))$$

Y la potencia mecánica entregada es el producto del par por las revoluciones:

[10]

$$P(W) = Q * N = K_Q * (I_{bat} - I_0) \frac{1}{K_E} * (V_{bat} - I_{bat} * (R_m + R_{var}))$$

Como  $K_E$  era igual a  $K_Q$  queda:

[11]

$$P(W) = (I_{bat} - I_0) * (V_{bat} - I_{bat} * (R_m + R_{var}))$$

Siendo la potencia eléctrica consumida el producto de  $V_{bat}$  por  $I_{bat}$ .

Y el rendimiento de la conversión electro mecánica quedaría:

[12]

$$\eta_{e-m} = \frac{(I_{bat} - I_0) * (V_{bat} - I_{bat} * (R_m + R_{var}))}{V_{bat} * I_{bat}}$$

Para que el rendimiento sea alto tendremos que tener  $I_0$  baja y  $R_m$   $R_{var}$  bajas.

Segunda optimización: Como no podía ser menos para tener un alto rendimiento hay que seleccionar variadores de calidad con poca resistencia y motores con poca resistencia o lo que es lo mismo variadores y motores con mucha sección conductora o lo que es lo mismo MUY PESADOS. ¡Ojo! no hay que pasarse, el motor y el variador vuelan todo el rato.

Los motores que tengan poca intensidad en vacío serán de buena fabricación con poco entrehierro y pocas pérdidas magnéticas en las bobinas (los de laminas finas y hierro de baja histéresis).

Las pérdidas por rozamiento y las pérdidas en el hierro que tienen que ver con un par de fricción las mide  $I_0$  que es como un par resistente que tiene que ver con las pérdidas por cada vuelta y las pérdidas en el cobre lógicamente las representa  $R_m$ .

Para concretar, la motorización que he dado en utilizar en la temporada 2010 tiene las siguientes características que he medido y calculado.

$$R_{var} = 0,008 \text{ Ohm}$$

$$R_m = 0,083 \text{ Ohm}$$

$$I_0 = 1,43 \text{ A}$$

$$K_v = 815 \text{ rpm/v}$$

Consumiendo unos 285 Watios al final de las 4 mangas y con un patético 73% de rendimiento en la conversión electromecánica (nada del 85% que se dice por ahí).

Para medir  $R_{var}$  he utilizado un osciloscopio para visualizar las caídas en el variador, no recomiendo a nadie que se compre un osciloscopio para medirlo porque al final lo que nos interesa es la suma de  $R_{var}$  y  $R_m$ .

Para calcular las otras constantes lo que he hecho ha sido medir las revoluciones del eje, la tensión de la batería y la corriente entregada. Todo ello medido en dos condiciones: en vacío con el eje al aire y con una hélice de tamaño razonable al motor en cuestión.  $I_0$  se saca directamente de la primera medida y  $K_v$  y  $R_m$  de la resolución de dos ecuaciones con dos incógnitas de la fórmula [9].

El Valor que el fabricante publica para mi motor es:

$K_v = 800 \text{ rpm/v}$  y  $R_m = 50 \text{ mOhm}$  como siempre los fabricantes nos dan cifras muy optimistas. Aunque no todo es culpa del fabricante, en los valores de  $K_v$  y  $R_m$  también influyen los parámetros de configuración y capacidad de control del variador, la forma de onda que éste genera y el así llamado avance (timing) del variador que es como el avance de las delgas de un motor de escobillas. Cuanto más cuadrada sea la onda que genera el variador más alto será  $K_v$  y mayor el valor de  $I_0$  y de  $R_m$  que mediremos estos efectos los veremos en un futuro artículo dedicado a la configuración del variador.

Obsérvese que aquí todavía no hemos utilizado directamente el  $K_v$  del motor. Lo dejaremos para el próximo capítulo porque del  $K_v$  depende la velocidad de arrastre de la hélice que también tiene su punto de optimización.

Si alguien tiene alguna consulta puede enviarme un e-mail a la dirección de más abajo y si está en mi mano haré por aclararla.

Javier Hernández Rodero. Madrid 11 Febrero 2011.

[japi@clubpetirrojo.com](mailto:japi@clubpetirrojo.com)

Prohibida la reproducción total o parcial sin consentimiento escrito del autor.