

EL6000 – Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables
Pauta clase auxiliar 1 – Electromagnetismo y máquinas eléctricas

Problema 1

¿Qué tipo de máquinas recomendaría para las siguientes aplicaciones?

a) Generación eólica:

Para generar electricidad a partir del viento es posible utilizar los 2 tipos de máquinas alternas que ya conocemos: una **máquina de inducción** o una **máquina sincrónica**.

De acuerdo al tipo de máquina que se utilice se tendrán distintos tipos de funcionamiento, lo que está determinado por distintas tecnologías.

Se recomienda cualquier de estas máquinas pensando en la conexión a sistemas que estén actualmente funcionando con corriente alterna, donde se pueda inyectar potencia desde un parque eólico.

Ahora, debido a la gran variabilidad de la velocidad del viento, lo que hará girar el eje de la máquina a diferentes velocidades, no es posible utilizar máquinas sincrónicas conectadas directamente a la red y necesitarán de dispositivos de electrónica de potencia para la conexión. Por este motivo, y debido a que los elementos de electrónica de potencia son de gran costo, es que en general se utilizan máquinas de inducción.

En la Unidad de Energía Eólica se verá con mayor detalle cada tecnología utilizada en la actualidad.

b) Generación mini-hidro

Al igual que en el caso anterior, una central mini-hidro está pensada para funcionar con sistemas alternos. Sin embargo en este caso, es muy factible controlar la cantidad de agua que pasará por la turbina, logrando de esa forma un gran control de velocidad para el giro de la máquina y por lo tanto se recomienda utilizar **máquinas sincrónicas** que se conectan directamente a la red.

c) Central hidroeléctrica

Una central hidroeléctrica es un caso en grandes magnitudes del anterior, en donde incluso existen mejores técnicas para controlar el flujo de agua que pasa por la turbina, por lo tanto la máquina recomendada es sin duda una **máquina sincrónica**.

d) Motor de correa transportadora

Debido a que lo que importa en este caso es tener una velocidad y un torque variable para mover distintas cantidades de material, es recomendable utilizar **máquinas de corriente continua** o **máquinas de inducción**.

Sin embargo hay que tener en consideración que para ambos casos es necesario utilizar electrónica de potencia. En el caso de la máquina continua, es necesario rectificar la tensión alterna de la red para poder alimentar la máquina, pero luego el control es bastante simple y de bajo costo.

Por otro lado la máquina de inducción, necesita un control bastante inteligente para poder variar su velocidad fácilmente y para ello necesita un “variador de frecuencia”, que corresponde a un rectificador en cascada con un inversor que modifica la frecuencia de la señal sinusoidal. Esto último corresponde a mayores inversiones. Sin

embargo, como los costos de la electrónica de potencia han bajado sumado a que las máquinas de inducción necesitan menor mantención ya que no tienen partes rozantes, es que las viejas máquinas de continua han empezado a ser reemplazadas por nuevas máquinas de inducción electrónicamente controladas.

e) Motor de disquetera de computador

Las disqueteras son un caso muy atractivo ya que utilizan **máquinas sincrónicas** para su funcionamiento. Esto es, se alimentan con tensión continua pero tienen un pequeño inversor que genera una señal alterna. En la práctica los motores de disquetera se les nombra BLDC (brush-less DC motors), ya que se alimentan con corriente continua pero no tienen escobillas en el estator, porque en realidad son sincrónicas.

f) Motor de auto de juguete

Debido a que la fuente de energía más fácil de transportar corresponde a una batería de corriente continua, entonces es recomendable diseñar un auto de juguete con una **máquina de continua** como motor.

g) Grupo electrógeno

Un grupo electrógeno corresponde a un equipo motor-generador. El motor es alimentado por algún tipo de combustible (gas, diesel, bencina), el que se quema para hacer girar la turbina, esta está acoplada al eje de una máquina que se conectará a una red eléctrica. Debido a que es fácil controlar el giro del motor con la combustión lo más recomendable entonces es utilizar una **máquina sincrónica** para generar electricidad.

h) Bomba de extracción de agua de pozo

Debido a la variabilidad de la cantidad de agua y a la altura a la que esta se encuentra en un pozo, es que una máquina debe ser capaz de variar su velocidad para sacar agua siempre de la forma más óptima posible. Ahora en la práctica es poco común que se haga "de la forma más óptima" y simplemente se saca toda el agua que se pueda, por ello se utiliza una **máquina de inducción** que sólo necesita ser alimentada con corriente alterna en el estator y no es necesario realizar ninguna transformación.

Por otro lado, aprovechando el uso típico de máquinas de inducción en esta aplicación, es que se siguen utilizando al querer ser más óptimos, agregando electrónica de potencia para su control.

Recordar que de usar una máquina de continua hubiese sido necesario rectificar la red alterna y de utilizar una máquina sincrónica es necesario alimentar la excitación con corriente continua.

i) Molienda SAG

Un molino SAG es un gran motor en que en su interior se encuentra material a ser molido. Para ello, junto con el material, se colocan grandes bolas de acero, las que tienen la tarea de caer sobre el material para molerlo.

Para que exista un gran control sobre la caída de las bolas de acero y estas provoquen mejores resultados en la molienda, es que se necesita una máquina que mantenga una velocidad muy constante por un largo tiempo, pero que pueda ser modificada cuando, por ejemplo, las bolas de acero se hacen más pequeñas al irse rompiendo con el material. Además esta velocidad debe ser muy lenta para que por gravedad las bolas de acero puedan caer cuando estén muy alto.

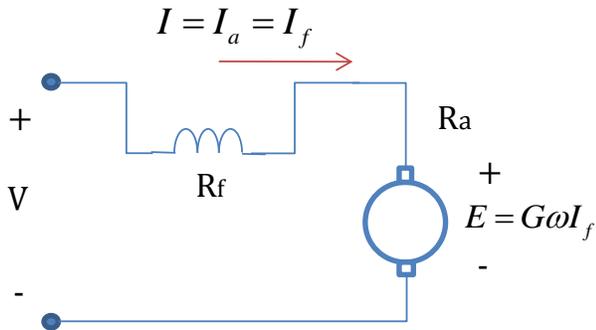
De esta forma es necesario una máquina que mantenga su velocidad constante, y por lo tanto una **máquina sincrónica** pero que debe ser muy lenta y que pueda ser variable si cambian las características del sistema y por lo tanto es necesario utilizar electrónica de potencia en su alimentación para lograr este objetivo.

Problema 2

Dibuje las curvas torque velocidad de los siguientes motores:

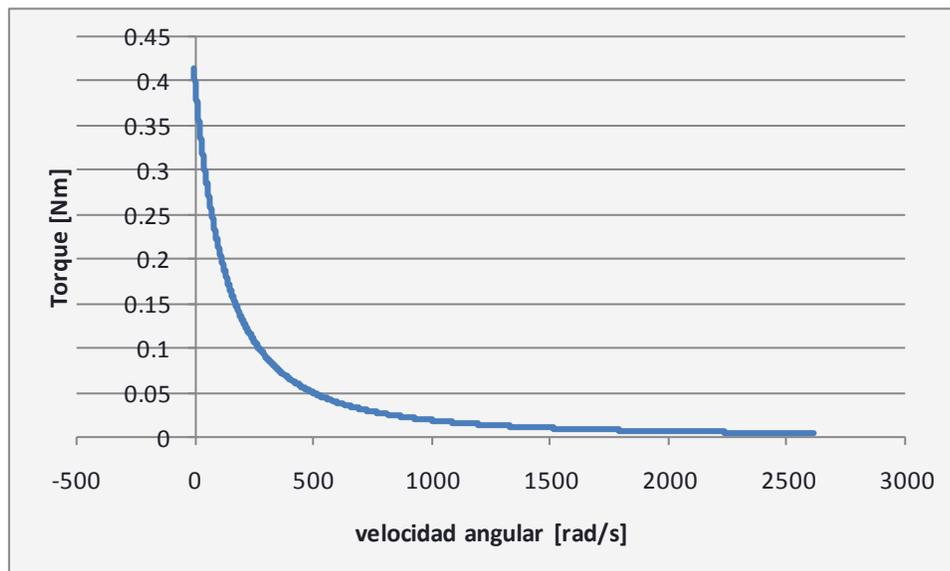
a) Motor CC conexión serie

La curva torque velocidad de un motor CC conexión serie está dada por las siguientes ecuaciones:



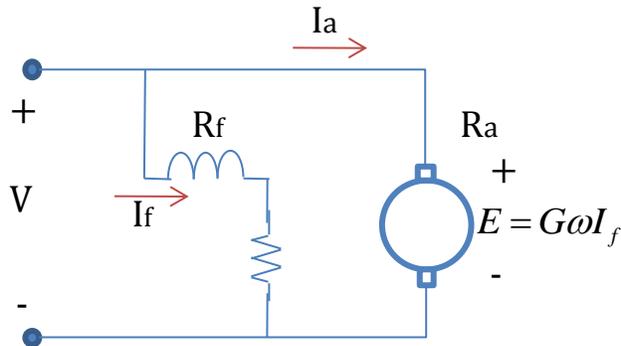
$$\begin{aligned}
 V &= (R_a + R_f)I + E & P &= E \cdot I \\
 E &= G\omega I_f & T &= \frac{P}{\omega} \\
 \Rightarrow T &= GI^2 = \frac{GV^2}{(R_a + R_f + G\omega)^2}
 \end{aligned}$$

Y por lo tanto la curva torque velocidad es de la forma:



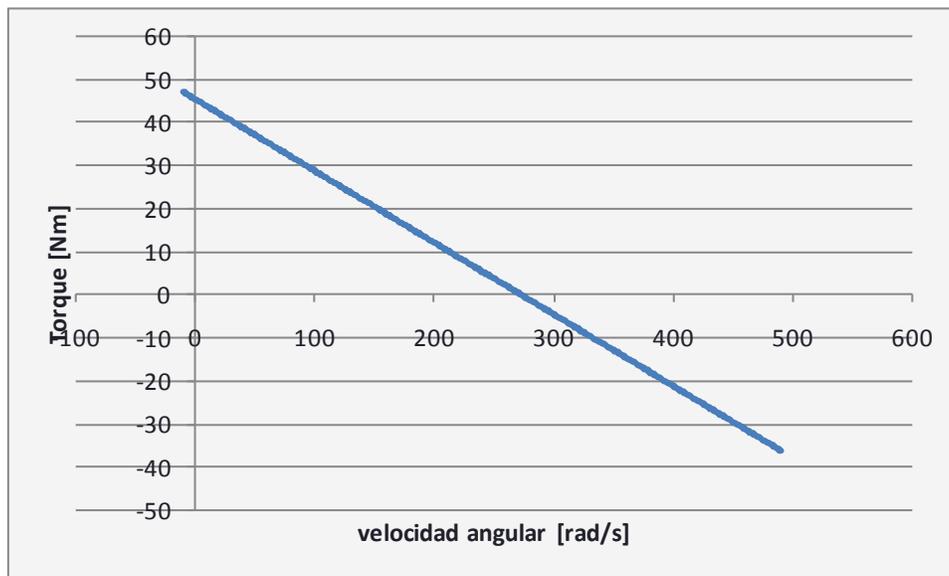
b) Motor CC conexión shunt

La curva torque velocidad de un motor CC conexión serie está dada por las siguientes ecuaciones:



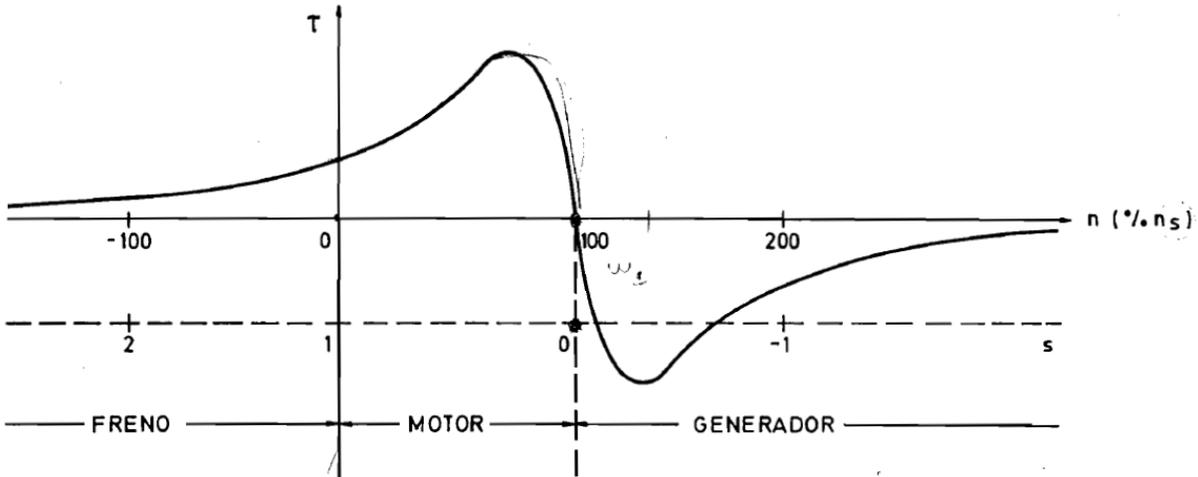
$$\begin{aligned}
 V &= R_a I_a + E & P &= E \cdot I \\
 E &= G \omega I_f & T &= \frac{P}{\omega} \\
 I_f &= V / R_f \\
 \Rightarrow T &= G I_a I_f = \frac{G V}{R_f R_a} \left(V - \frac{G \omega V}{R_f} \right)
 \end{aligned}$$

Y por lo tanto la curva torque velocidad es de la forma:



c) Motor de inducción

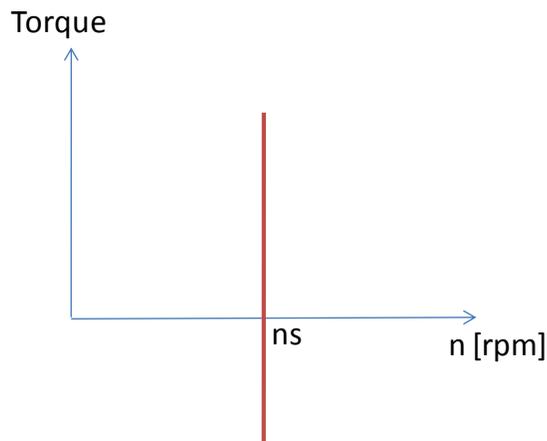
La curva torque-velocidad de la máquina de inducción es la siguiente:



En que n corresponde a la velocidad de giro en [rpm], y n_s es la velocidad sincrónica. Por lo tanto es importante ver que a la velocidad sincrónica ($100\%n_s$), el torque es NULO.

d) Motor sincrónico

La curva torque-velocidad de la máquina sincrónica es la siguiente:



Es decir, solamente gira a la velocidad sincrónica y girando a esa velocidad puede entregar cualquier torque. Los valores de torque están limitados por operación técnica de la máquina, es decir, por límites de temperatura, estabilidad, etc.

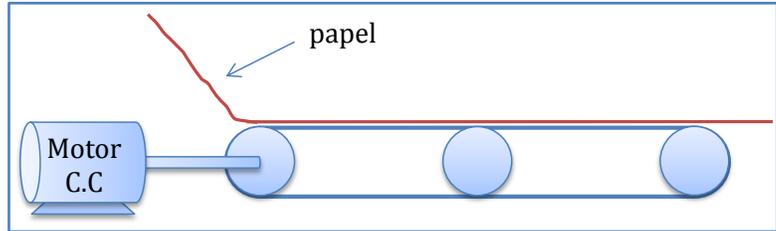
Problema 3

En una papelera se posee un motor C.C. conexión shunt para mover una correa transportadora. Este tipo de procesos necesita estar a una velocidad lo más constante posible para no romper el material. La velocidad de operación debe ser estrictamente 480[rpm].

La máquina, alimentada con 220[V], tiene una resistencia de armadura $R_a = 3,9[\Omega]$, una resistencia de campo $R_f = 452,6[\Omega]$ y una inductancia rotacional $G = 1,66[H]$.

El torque resistivo de la carga varía con respecto a la velocidad angular de giro de la forma:

$$T_R = 0,2 + 7 \cdot 10^{-2}\omega + 3 \cdot 10^{-3}\omega^2 [Nm]$$



- a) Si la máquina operara sin ningún implemento extra:
 - i. ¿cuál sería la velocidad de operación en [rpm]?
 - ii. ¿es recomendable utilizar de esta forma la máquina de acuerdo a las condiciones de operación?
 - iii. ¿Cuál es el torque que debe entregar la máquina en esta condición de operación?
- b) Proponga un control reostático para lograr hacer funcionar correctamente la máquina:
 - i. Dimensione los implementos necesarios.
 - ii. Calcule la eficiencia del sistema en este caso.
 - iii. ¿Qué sucedería si por algún motivo se desconectaría el enrollado de campo? Responda analíticamente.

- Datos del motor CC (shunt):

$$V = 220[V], \quad R_a = 3.9[\Omega]$$

$$R_f = 452.6 [\Omega], \quad G = 1.66 [H]$$

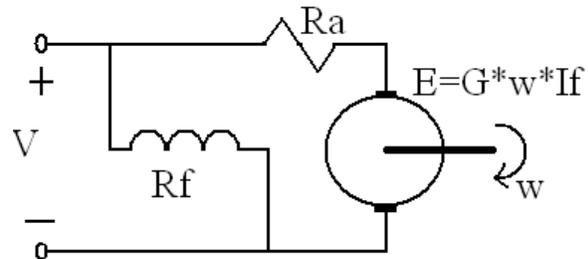
- Torque resistivo de la carga :

$$T_R = 0.2 + 0.07\omega + 0.003\omega^2 [Nm]$$

a) Si la máquina opera sin ningún implemento extra:

$$I_f = \frac{V}{R_f} = 0.4861[A]$$

$$T_M = \frac{GI_f}{R_a}(V - G\omega I_f) = 45.5189 - 0.1670\omega[Nm]$$



- i. Haciendo $T_M = T_R$ se obtiene la velocidad de operación: $\omega = 89.6 [rad/s] = 855.6[rpm]$.
- ii. Por lo tanto, no es apropiado usar la máquina de esta forma, ya que se requiere que la velocidad de operación sea $\omega^* = 480[rpm] = 50.27 [rad/s]$.
- iii. A velocidad ω^* , el torque suministrado por el motor debería ser igual al torque resistivo de la carga: $T_M = T_R(\omega^*) = 11.3[Nm]$. Sin embargo, se está entregando un torque de $T_M(89.6) = 30.6 [Nm]$.

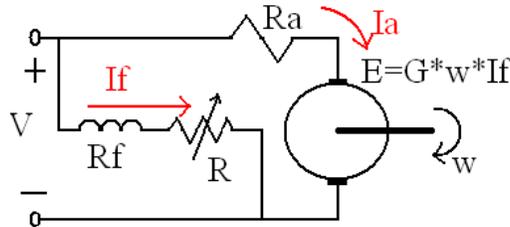
b) Se propone un control reostático en el enrollado de campo (agregar una resistencia en serie al enrollado):

Se tiene que el torque motriz viene dado por $T_M = \frac{GI_f}{R_a}(V - G\omega I_f)$. Se debe imponer que a velocidad ω^* , $T_M = 11.3[Nm]$. Para esto, a velocidad ω^* , se tiene que el torque en función de la corriente de campo es:

$$T_M = 93.6410 \cdot I_f - 35.5190 \cdot I_f^2 = 11.3[Nm]$$

$$\Rightarrow I_f = 0.1268[A]$$

Obs: la otra solución para I_f es mayor que el caso sin reóstato, por lo que es imposible alcanzarla, ya que requeriría reducir la resistencia en el campo (lo que NO se puede lograr colocando una resistencia en paralelo).



- i. Como la conexión es shunt, la corriente de campo viene dada por $I_f = \frac{V}{R_f + R}$. Luego, $I_f = 0.1268[A]$ para una resistencia de reóstato $R = 1282.4[\Omega]$. En este caso se tiene:

$$\begin{aligned} 220[V] &= 3.9[\Omega] \cdot I_a + 1.66[H] \cdot 50.27[rad/s] \cdot 0.1268[A] \\ I_a &= 53.6971[A], \quad E = 10.5812[V] \\ P_{in} &= V \cdot (I_a + I_f) = 11841.26[W] \\ P_{out} &= E \cdot I_a = 568.18[W] \end{aligned}$$

- ii. Con lo que la eficiencia resulta ser de:

$$\eta = 4.8\%$$

Lo que era de esperarse debido a las pérdidas en la resistencia que se agrega al sistema.

- iii. Si se llegara a desconectar el enrollado de campo:

$$I_f = 0 \Rightarrow E = G\omega I_f = 0 \Rightarrow P_{out} = I_a \cdot E = 0 \Rightarrow T_M = \frac{P_{out}}{\omega} = 0$$

El torque motriz se hace cero. Luego, esta curva de torque resistivo **frena** la máquina, hasta llegar a un punto en que $T_R = T_M = 0$. De la ecuación de T_R , si la máquina va disminuyendo su velocidad, el primer punto con torque nulo que encuentra es a velocidad $\omega = -3.333[rad/s] = -31.83[rpm]$ (invierte sentido de giro).

El análisis anterior es válido para el régimen permanente. En el transitorio se debe considerar que debido a los flujos remanentes, la tensión interna E se mantiene un momento, con lo cual hay un instante durante el cual se entrega potencia activa al eje, aún sin corriente de campo. Para esto, se modela la desconexión como un incremento constante de la resistencia de campo hasta el infinito (o caída constante de la corriente de campo hasta cero).

El torque motriz como función de la velocidad y la corriente de campo es:

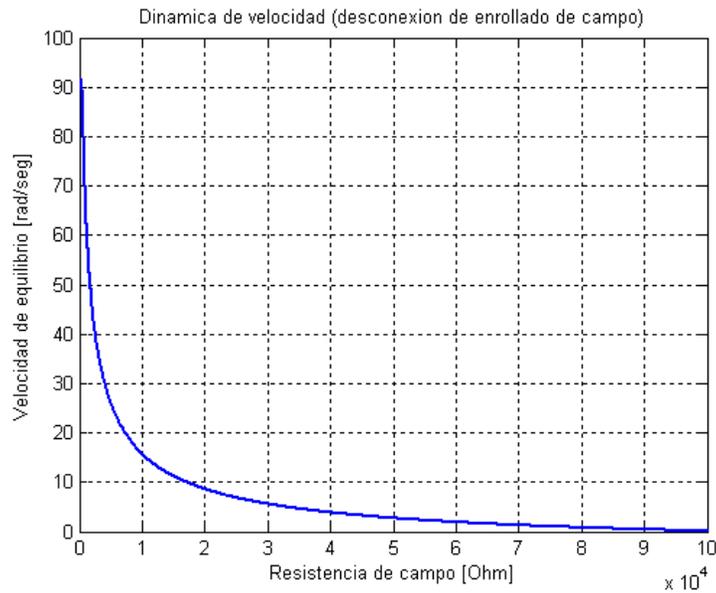
$$T_M = 93.641 \cdot I_f - 0.7066 \cdot I_f^2 \cdot \omega$$

Si se interseca esta curva con la de torque resistivo, la velocidad de equilibrio parametrizada en I_f es:

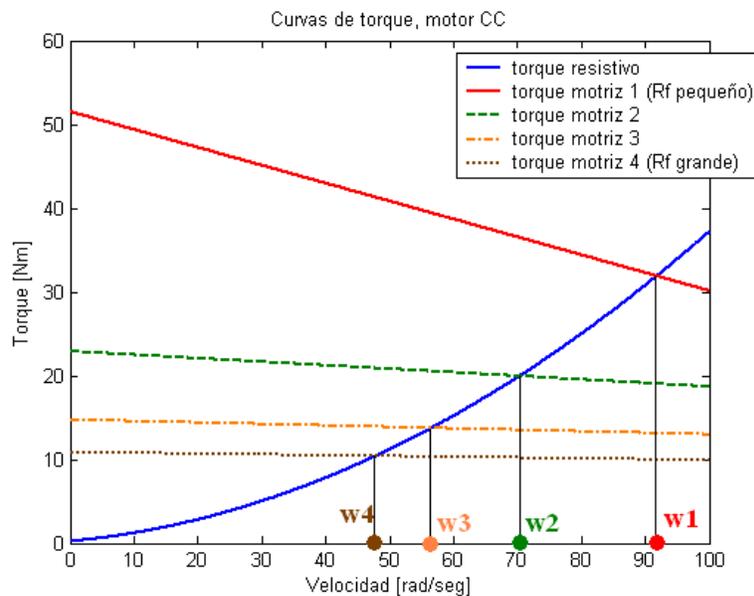
$$\omega_{eq} = \frac{-(0.07 + 0.7066I_f^2) + \sqrt{(0.07 + 0.7066I_f^2)^2 - 4 \cdot 0.003 \cdot (0.2 - 93.641I_f)}}{2 \cdot 0.003}$$

Para evitar derivar: se observa que dada una corriente de campo positiva, un incremento de esta hace crecer en más medida el valor de la raíz que el valor que se resta. Luego, la velocidad es función creciente de I_f (y función decreciente de R_f).

Con lo que w en función de R_f resulta de la forma:



Así, la velocidad decrece a medida que aumenta la resistencia de campo, lo que significa que en el transiente el motor tendrá la misma tendencia que en régimen permanente: a frenarse. Este hecho puede verse en las curvas de torque de forma más sencilla. Si se grafica la curva de torque resistivo y sucesivas curvas de torque motriz con I_f decreciente, se verá en qué puntos se van intersectando.



Se debe recordar que este último análisis es transiente, y que finalmente el motor termina en el punto de equilibrio donde el torque resistivo se hace nulo.