

SIMULACIÓN DE UN MOTOR DE CC CON ECOSIMPRO

PROYECTO DE SIMULACIÓN

Raúl Gutiérrez Perucho
Universidad Politécnica de Madrid, DISAM
e-mail: raul.gutierrez@itesm.mx

1 RESUMEN

El presente trabajo muestra la simulación de una maquina de corriente continua o directa utilizando el programa Ecosimpro. El objetivo del trabajo es mostrar las ventajas que presenta este software en la simulación de sistemas dinámicos, así mismo se pretende demostrar como la simulación puede ser una excelente herramienta para conocer sistemas sin necesidad de trabajar en laboratorios físicos, es decir los llamados laboratorios virtuales pueden ser una excelente herramienta de apoyo en los cursos donde normalmente se requiere el trabajo en laboratorios para dominar los conceptos teóricos. No se pretende argumentar que se pueden sustituir los laboratorios físicos por este tipo de simuladores, pero si se puede comentar que pueden ser una excelente herramienta de apoyo en muchos cursos de ingeniería.

El uso del Ecosimpro muestra grandes cualidades, cuando lo comparamos con otras herramientas de simulación, algunas de estas cualidades son:

- Elevado nivel de abstracción
- Las ventajas de un lenguaje orientado a objetos como herencia, agregación, etc., esto tiene una gran ventaja porque permite hacer modelos sofisticados en forma muy simple.
- Sintaxis muy simple
- Posee una herramienta de dibujo (actualmente EcoDiagram), que permite crear iconos de componentes y facilita el diseño de modelos.
- Permite diferentes tipos de análisis (transitorios, estado estable, sensibilidad y optimización)
- Las conexiones de los diferentes elementos son reales (es decir son flechas mecánicas, fluidos, etc.)
- Es un simulador de propósito general (es decir que se pueden implementar modelos de diferentes tipos, como eléctricos, electrónicos, químicos, mecánicos, etc.)
- Posee una herramienta de visualización de resultados muy poderosa llamada EcoMonitor.

2 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta solo la simulación de un motor de CC con devanado de campo excitado separadamente, sin embargo se puede implementar la simulación de los diferentes tipos de conexión (paralelo, serie, compuesta acumulativa y compuesta sustractiva) muy fácilmente. Para mostrar la bondad de esta herramienta de simulación se muestra no solo el modelo de la conexión normal para un motor de CC, se presenta también la implementación de un arrancador para este tipo de motores y la conexión para lo que se conoce como prueba de circuito abierto, donde se utilizan dos máquinas de CC, una funcionando como motor y la otra como generador.

3 MODELO DE UNA MAQUINA DE CC

El motor de CC es un dispositivo electromecánico que convierte la energía eléctrica en energía mecánica (figura 1).

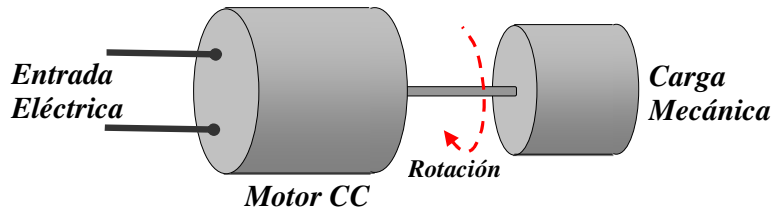


Figura 1 Motor de CC

El motor consta básicamente de dos bobinas, una llamada de campo y la otra llamada de armadura, esta última puede girar libremente. La bobina de armadura está ubicada en un campo magnético generado en forma normal por una corriente que fluye por la bobina de campo. Cuando una corriente I_a fluye por la bobina de armadura y debido a que está en un campo magnético, sobre la bobina actúan fuerzas que lo hacen girar (figura 2).

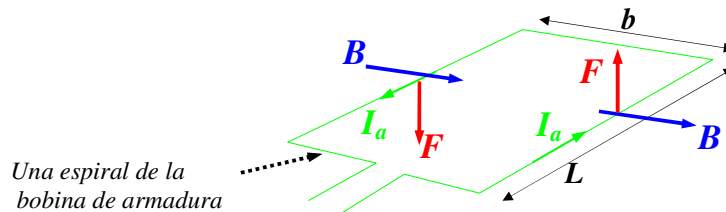


Figura 2 Principio básico del motor

La fuerza F que actúa sobre el alambre de longitud L por el cual pasa una corriente I_a , en un campo magnético con una densidad de flujo B , ortogonales al alambre está dada por:

$$F = BI_a L$$

Con N alambres:

$$F = NBI_a L$$

Las fuerzas sobre los alambres de la bobina de armadura dan por resultado un par T_d , donde $T_d = Fb$, y b es el ancho de la bobina. De este modo,

$$T_d = NBI_a Lb$$

El par resultante es proporcional a BI_a , los otros factores son constantes, por lo tanto, se puede escribir, $T_d = K_1 BI_a$

Como la densidad de flujo magnético depende de la corriente de campo, entonces podemos escribir la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$T_d = L_{af} I_f I_a$$

Donde L_{af} es la inductancia mutua entre la bobina de campo y la de armadura.

Puesto que la armadura es una bobina giratoria en un campo magnético, en este se inducirá un voltaje como resultado de la inducción electromagnética. La dirección de este voltaje será de modo tal que se oponga al cambio que lo produce y se denomina fuerza contraelectromotriz. Esta fuerza contra-

electromotriz V_e es proporcional a la velocidad de rotación de la armadura y al flujo eslabonado por la bobina, por lo tanto, a la densidad de flujo B . De este modo:

$$V_e = K_2 B \omega$$

donde ω es la velocidad angular del eje y K_2 es una constante. Como ya dijimos la densidad de flujo magnético depende de la corriente de campo, así que finalmente obtenemos la ecuación para la fuerza contraelectromotriz:

$$V_e = L_{af} I_f \omega$$

El circuito de armadura se puede considerar como una resistencia R_a en serie con una inductancia L_a y una fuente de fuerza contraelectromotriz, como se muestra en la figura 3. De esta manera si V_t es el voltaje aplicado al circuito de armadura, entonces:

$$V_t = V_e + R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt}$$

Para el circuito de campo tenemos la siguiente ecuación:

$$V_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt}$$

En la parte mecánica observamos que la salida del motor es el par T_d , menos las pérdidas mecánicas del motor, entonces:

$$T_s = T_d - J_d \frac{d\omega}{dt} - B_d \omega$$

Donde J_d y B_d son la inercia y el amortiguamiento del rotor.

El par neto que actúa sobre la carga, despreciando la elasticidad torsional es:

$$\text{Par neto} = T_s - \text{par de amortiguamiento de la carga}$$

Donde el par de amortiguamiento es $B_L \omega$, y esto producirá una aceleración angular en la carga, por lo tanto tenemos la siguiente ecuación en la carga:

$$J_L \frac{d\omega}{dt} = T_s - B_L \omega$$

V_t =Tensión o voltaje de alimentación (volts)

I_a =Corriente de armadura (amp)

L_a =Inductancia de la armadura(H)

R_a =Resistencia de la armadura (Ω)

V_e = tensión o voltaje de armadura (volts)

V_f =Tensión o voltaje de campo (volts)

I_f =Corriente de campo (amp)

L_f =Inductancia del devanado de campo (H)

R_f =Resistencia del devanado de campo (Ω)

T_d =Par desarrollado (N.m)

J_a =Inercia del rotor (Kg.m^2)

B_a = amortiguamiento en el rotor ($\text{Kg.m}^2/\text{seg}$)

w =Velocidad angular (rad/seg)

J_L =Inercia de la carga(Kg.m^2) →En la librería de Ecosimpro aparece como I

B_L =amortiguamiento de la carga($\text{Kg.m}^2/\text{seg}$) →En la librería de Ecosimpro aparece como kf

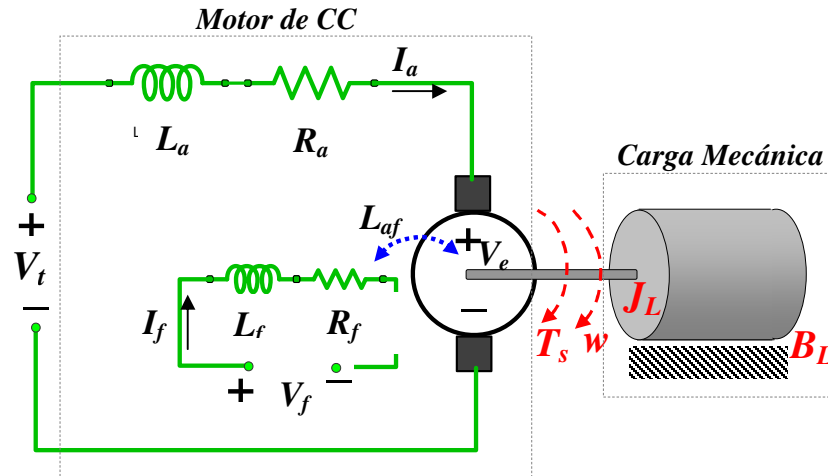


Figura 3 Circuito Equivalente de una maquina de CC

4 SIMULACIÓN

Para realizar la simulación de la operación del motor de CC bajo diferentes condiciones, se requirió el desarrollo de los siguientes componentes en Ecosimpro:

a) Componente Maquina de CC: (Código en EL Modeling Lenguaje)

-- Maquina de Corriente Directa

USE ELECTRIC

COMPONENT CD_m

PORTS

IN Elec e_a_p
OUT Elec e_a_n
IN Elec e_f_p
OUT Elec e_f_n
OUT Shaft sh_out

DATA

REAL Ra=2.2 "Resistencia de la Armadura en ohms"
REAL La=0.0063 "Inductancia de la Armadura en H"
REAL Lf=0.0001 "Inductancia del campo en H"
REAL Rf=3 "Resistencia del campo en ohms"
REAL Laf=0.002 "Inductancia mutua campo armadura en H"
REAL Jd=0.0236 "Inercia Total en Kg.m2"
REAL Bd=0.015 "amortiguamiento en Kg.m2/seg"

DECLS

REAL Te "Par desarrollado por la armadura"

CONTINUOUS

e_a_p.i=e_a_n.i
e_f_p.i=e_f_n.i
sh_out.T=e_f_p.i*Laf*e_a_p.i-sh_out.w'*Jd-sh_out.w*Bd
e_a_p.v-e_a_n.v=e_f_p.i*Laf*sh_out.w+Ra*e_a_p.i+La*e_a_p.i'
e_f_p.v-e_f_n.v=Rf*e_f_p.i+Lf*e_f_p.i'
Te=e_f_p.i*Laf*e_a_p.i

END COMPONENT

La figura 4 muestra el icono diseñado en Ecodiagram para este componente.

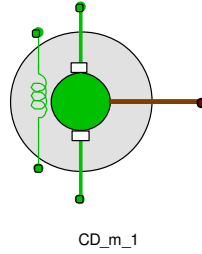


Figura 4 Componente Motor CC desarrollado en Ecosimpro

b) Componente Switch: (Código en EL Modeling Lenguaje)

```

-----
-- Switch.....20/Mzo/04...Raúl Gutiérrez
-----

USE ELECTRIC

COMPONENT Switch IS_A AbsSwitch

    DATA
        REAL tc=2    "Tiempo de cierre del switch"

    DISCRETE
        WHEN (TIME>tc) THEN
            Open = FALSE
        END WHEN
END COMPONENT

```

La figura 5 muestra el icono diseñado en Ecodiagram para este compoenete.

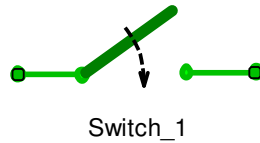


Figura 5 Componente Switch desarrollado en Ecosimpro

5 RESULTADOS

Las simulaciones realizadas para el motor de CC desarrollado, consistieron en tres arreglos diferentes:

- a) Conexión normal.
- b) Arrancador de un motor de CC.
- c) Conexión para prueba de Circuito Abierto.

5.1 Conexión normal

La figura 6 muestra la conexión para esta simulación, donde se utilizaron los siguientes datos:

- Ra = 0.6
 - La = 0.012
 - Lf = 12
 - Rf = 240
 - Laf = 1.8
 - Jd = 0.03
 - Bd = 0.015
 - JL(I) = 1
 - BL(kf) = 0.2287
 - Vf (VDC) = 240
 - Vt (VDC) = 240
- } **Datos de la carga mecánica**

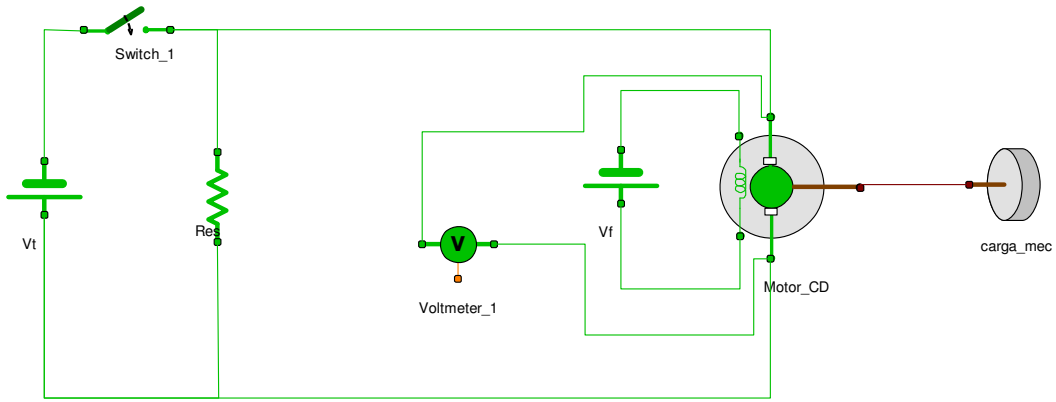


Figura 6 Conexión normal del motor de CC

La figura 7 muestra las gráficas obtenidas en esta simulación.

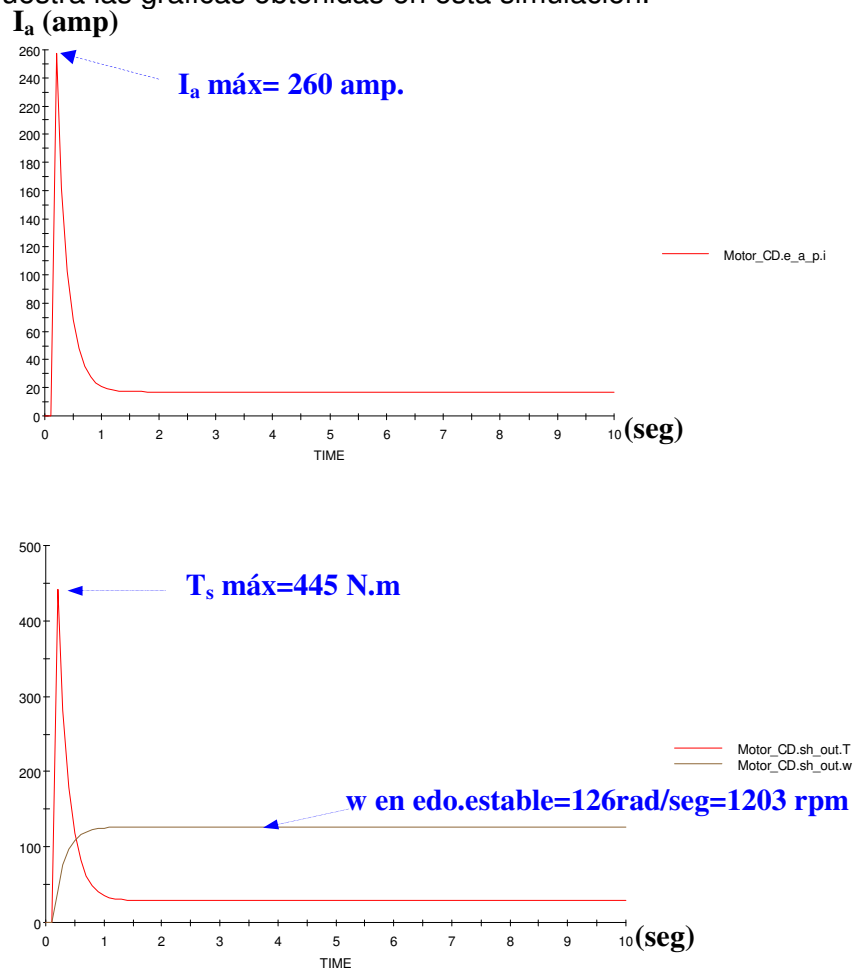


Figura 7 Resultados para la conexión normal

Si queremos aumentar la carga mecánica, esto lo simulamos con un mayor valor de inercia J_L . Los resultados obtenidos al aumentar la inercia de la carga de 1 a 10 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, se observan en las gráficas de la figura 8.

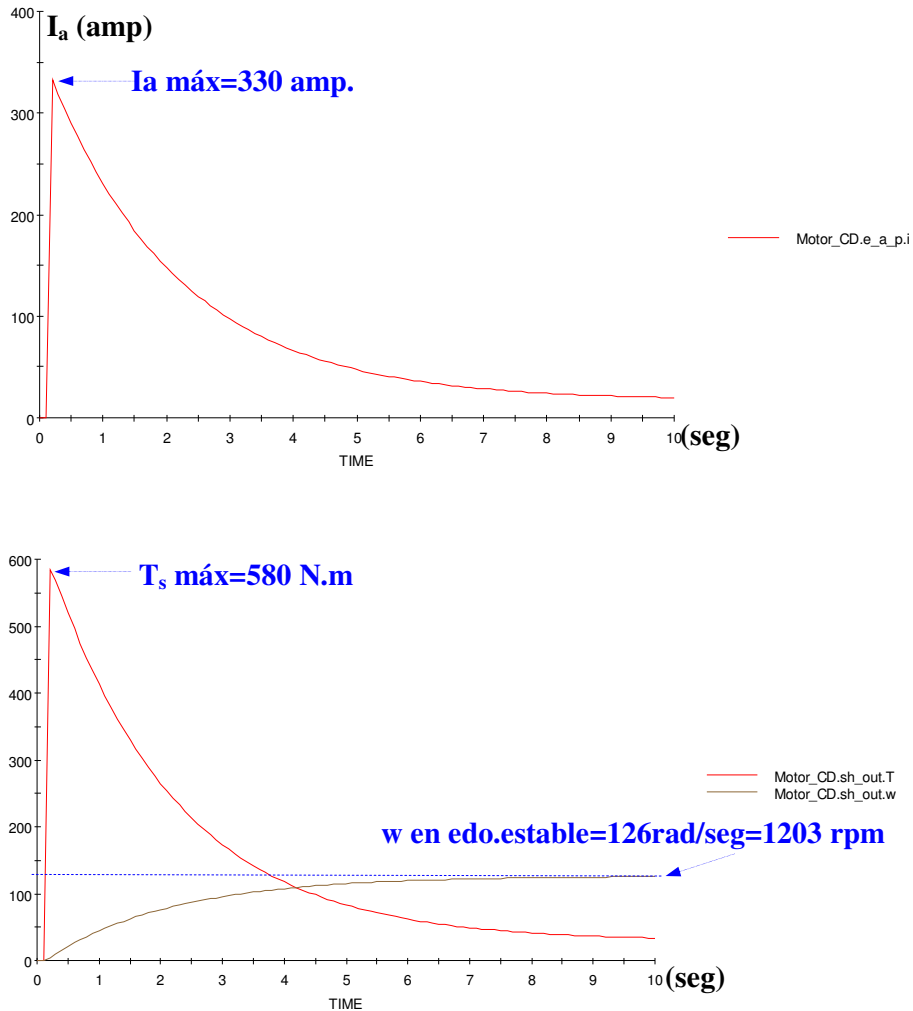


Figura 8 Resultados para la conexión normal con aumento de carga mecánica
 Se observa como al aumentar la carga mecánica se obtiene un aumento importante en la corriente y en el par durante el arranque, además se requiere mayor tiempo para llegar al estado estable. Lo anterior es lo que justifica el uso de arrancadores para motores de CC que mueven cargas grandes.

5.2 ARRANCADOR PARA UN MOTOR DE CC

En el motor simulado con los datos anteriores (con $J_L=1$), se implementó un arrancador con tres etapas, considerando los siguientes datos:

- $R_1= 3.66 \cdot \rightarrow t_c (S_1)= 2.85 \text{ seg}$
- $R_2= 1.64 \cdot \rightarrow t_c (S_2)= 4.84 \text{ seg}$
- $R_3= 0.74 \cdot \rightarrow t_c (S_3)= 6.85 \text{ seg}$

La conexión se muestra en la figura 9.

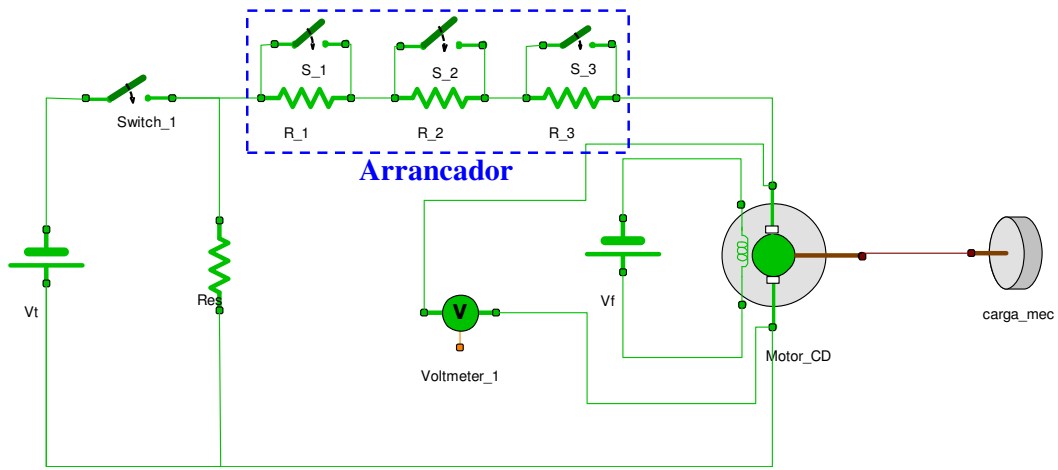


Figura 9 Conexión para el arrancador de un motor de CC

Los resultados de la simulación se muestran en las gráficas de la figura 10.

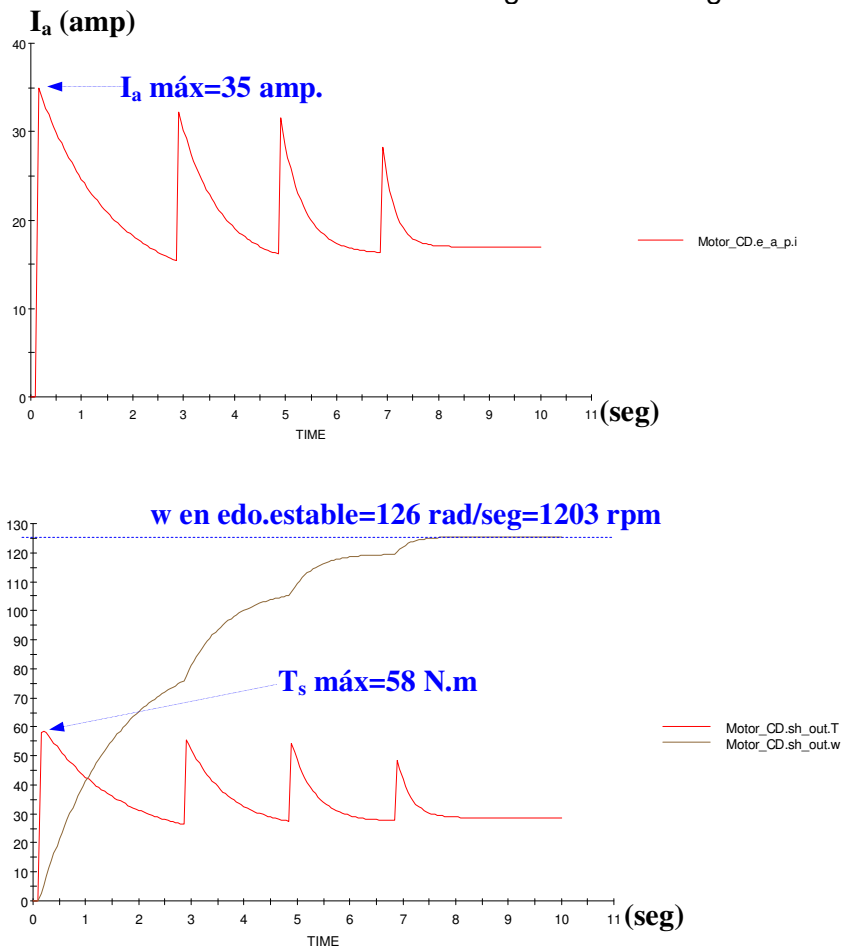


Figura 10 Resultados para la conexión con arrancador

Se observa como el arrancador limita muy adecuadamente los valores máximos de corriente en la armadura y el par en la salida. La figura 11 muestra la gráfica del voltaje aplicado al motor, obtenida por el voltímetro instalado en las terminales del motor.

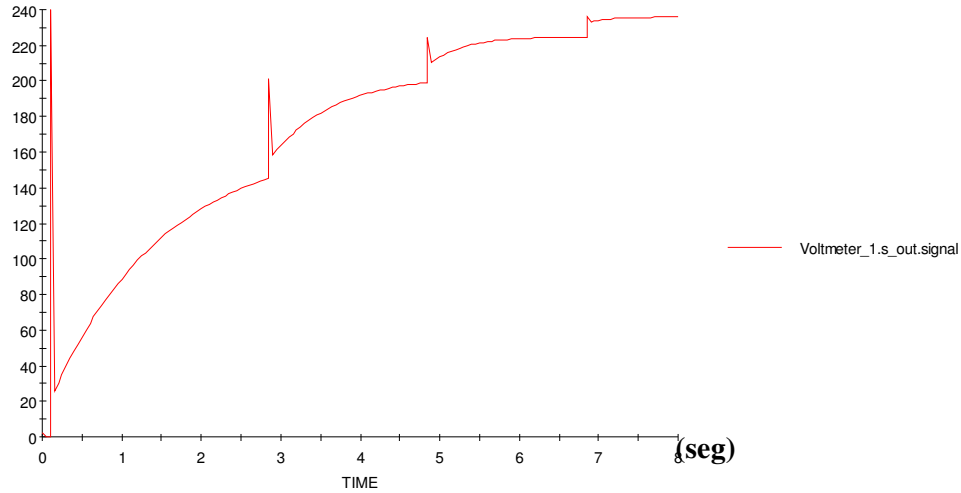


Figura 11 Voltaje aplicado al motor con el arrancador

5.3 CARACTERISTICA DE CIRCUITO ABIERTO

El modelo utilizado en la simulación que estamos realizando considera una relación lineal entre la corriente de campo I_f y el flujo magnético, esto es válido para valores normales de flujo, ya que para valores muy grandes se presenta saturación en el material ferromagnético. Esta linealidad se puede observar en la llamada prueba de circuito abierto, en la cuál se mide el voltaje V_e (igual a V_t) en circuito abierto para diferentes valores de corriente de campo, para una velocidad angular constante. Lo anterior se implementó en el circuito mostrado en la figura 12, donde la velocidad se obtuvo de un motor de CC y las mediciones se efectuaron sobre una segunda máquina de CC operando como generador, en las terminales donde se efectúa la medición se conectó una resistencia muy alta ($100,000\Omega$) que simula el circuito abierto. Las variaciones de la corriente de campo se obtuvieron al cambiar el voltaje V_f .

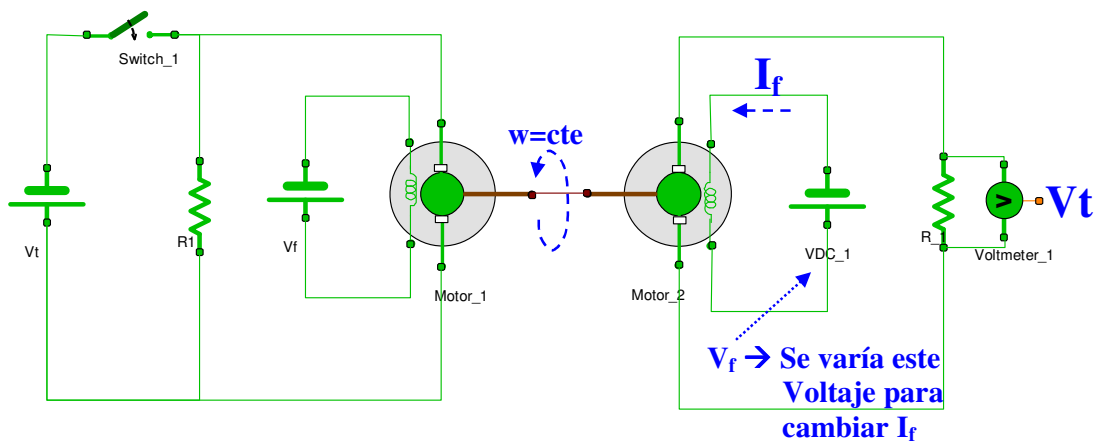


Figura 12 Prueba de circuito abierto

La gráfica no se obtuvo directamente, se realizaron cuatro pruebas donde se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 1 y graficados en la figura 13. La linealidad como se observa es muy evidente.

	V_f	I_f	V_t
1	1	0.04	0.55
2	50	0.21	27
3	100	0.42	55
4	150	0.63	83

Tabla 1

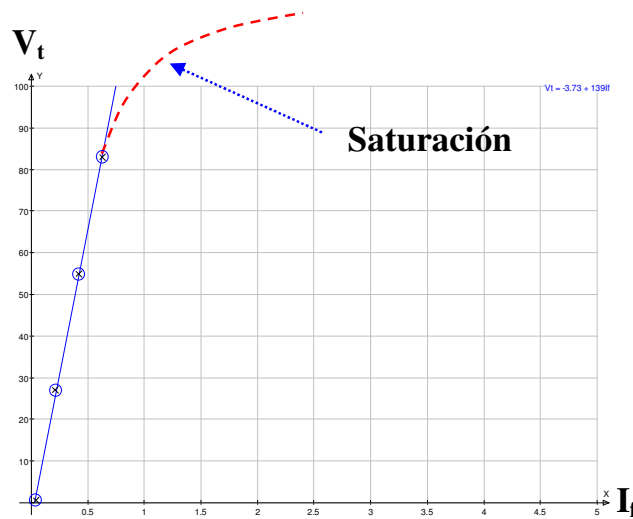


Figura 13 Resultado de la prueba de CA.

6 CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que el Ecosimpro es una excelente herramienta para realizar simulaciones. Una vez que se tienen las ecuaciones que modelan el sistema, el desarrollo de componentes es muy sencillo y más sencillo aun es desarrollar modelos de sistemas dinámicos sofisticados que utilicen estos componentes, gracias a las ventajas que presenta el que sea un programa orientado a objetos.

Realmente el programa Ecosimpro presenta grandes ventajas y seguramente en la medida que más personas lo conozcan su uso será cada vez mayor, quizás una recomendación podría ser el desarrollar mayor número de librerías, que estén a disposición de los usuarios del programa, esto promovería fuertemente su uso, como sucede con matlab, donde el desarrollo de las llamadas Toolbox han promovido el uso de este software, y la han convertido en un estándar para el análisis y simulación en muchas ramas de la ingeniería.

Finalmente se puede comentar que el uso de simuladores para entender el comportamiento de sistemas dinámicos como es el caso de las máquinas eléctricas, es una buena idea, y esto se demuestra en el interés de algunos usuarios de Ecosimpro que están trabajando en el desarrollo de librerías para este fin.

7 BIBLIOGRAFÍA

[1] EA International, ***EL Modeling Language*** ver. 3.2

[2] EA International, ***Ecosimpro User Manual*** ver. 3.2

[3] Cathey Jimmie J., ***Máquinas Eléctricas, Análisis y diseño aplicando Matlab***, Mc Graw Hill, 2002

[4] Tan Kiong Howe, ***Evaluation of the transient response of a DC motor using Matlab/Simulink***, Department of Electrical Engineering, University of Queensland, may 2003

[5] Alonso Rodriguez Angel M., Cátedra de Máquinas Eléctricas, ***Teoría de Maquinas de Corriente Continua y Motores de Colector***, Universidad Politécnica de Madrid, ETSII, 1995

[6] Theodore Wildi, ***Electrical Machines, Drivers and Power systems***, 4th Edition, Prentice Hall International, Inc. 2000