

1. Introducción

El estudio de la dinámica de sistemas físicos reales requiere de la utilización de técnicas avanzadas de modelización y de simulación. La variedad de fenómenos físicos involucrados en dichos sistemas exige el uso de una metodología estructurada para la obtención del modelo matemático. En este punto, los Diagramas de Enlace, o Bond Graphs [1,2], brindan una herramienta muy adecuada ya que permiten el acoplamiento de distintos subsistemas provenientes de diferentes dominios de la física y además constan de procedimientos metódicos para la obtención de los modelos correspondientes a cada uno de dichos subsistemas.

Por otro lado, la complejidad de los modelos matemáticos resultantes, que incluyen habitualmente ecuaciones diferenciales no lineales de alto orden, rígidas y con presencia de singularidades estructurales, torna imprescindible la utilización de técnicas avanzadas de simulación numérica.

Estos problemas motivaron el desarrollo de múltiples herramientas informáticas para la modelización y simulación de sistemas físicos con Bond Graphs. Entre las más conocidas se encuentran sin dudas 20Sim y Dymola, que permiten la simulación directa de los modelos Bond Graphs ingresados.

Con el propósito de explotar las modernas herramientas de simulación que provee el ambiente Matlab/Simulink, se desarrolló en nuestra facultad un software de modelización de Bond Graphs llamado Power DynaMo [3,4], que además de permitir la edición gráfica, la parametrización y el análisis causal automático de Diagramas Mixtos, realiza en forma automática la conversión de los mismos en Diagramas de Bloques de Simulink para su simulación en dicho entorno.

El objetivo de este trabajo práctico es entonces el de utilizar esta herramienta de software para resolver un problema complejo –estudiar la dinámica de un puente grúa– y familiarizar así al estudiante con la técnica de los Bond Graphs y con la utilización de Power DynaMo. Asimismo, se pretende afianzar diversos temas abordados anteriormente, relacionados a la dinámica del motor de continua, a los métodos de integración, y al análisis de las limitaciones de los modelos entre otros. Finalmente, se dejarán entrever algunos conceptos elementales del control por realimentación que quedarán abiertos para su discusión en asignaturas posteriores del área.

2. El sistema

El sistema sobre el que se trabajará es un puente grúa impulsado por un motor de corriente continua con excitación independiente. Se considerará para esto solamente el movimiento en un plano (ver Figura 1).

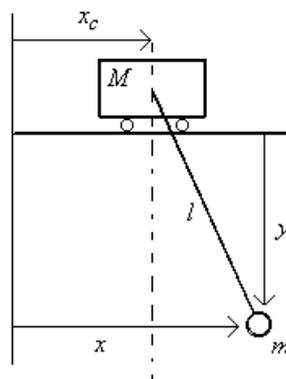


Figura 1. Esquema del Puente Grúa.

Las hipótesis que se formularán para la construcción del modelo son las siguientes:

- El cable posee elasticidad, cuya ley se supondrá lineal.
- Tanto la carga como el carro están sometidos a rozamiento viscoso.
- El motor se acopla al carro mediante un sistema de transmisión ideal.

Los parámetros del modelo se enumeran en la siguiente tabla.

M (masa del carro)	1000 Kg	b_j (coef. rozamiento del motor)	1.1 N.m.seg
b_M (coef. rozamiento en el carro)	1e6 Nseg/m	R_a (resistencia de armadura)	0.05 Ω
m (masa de la carga)	4000 Kg	R_e (resistencia de excitación)	25.2 Ω
b (coef. rozamiento de la carga con el aire)	100 Ns/m	L_a (inductancia de armadura)	0.003Hy
k (coef. elasticidad del cable)	1e6 N/m	U_{an} (tensión de armadura nominal)	460V
c (const. de reducción del motor al carro)	0.004 m/rad	U_{en} (tensión de excitación numinal)	184V
J (momento de inercia del motor)	15 Kg.m ²	K_m (Constante del motor)	0.016

La característica magnética del arrollamiento de excitación, en tanto, es la que se muestra en la Figura 2.

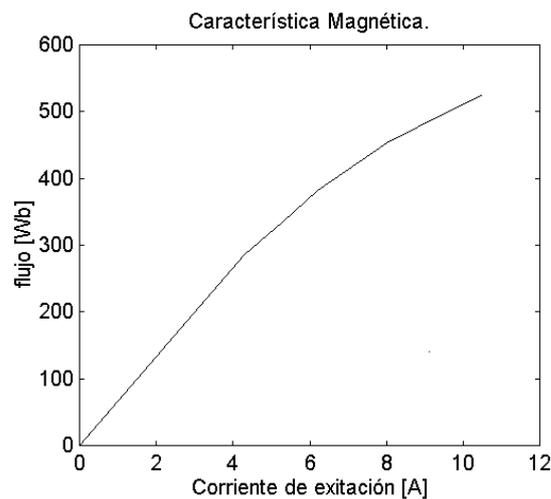


Figura 2. Característica Magnética

3. Trabajo Previo

Antes de concurrir al laboratorio, se deberá obtener un Diagrama Mixto del sistema, en el cual se distingan claramente el motor y el puente grúa. En dicho DM, deberán poder identificarse las siguientes variables físicas:

- Corriente de armadura en el motor.
- Flujo de excitación.
- Velocidad del motor.
- Velocidad del carro.
- Velocidades horizontal y vertical de la carga
- Posiciones horizontal y vertical de la carga.
- Longitud del cable.

Comparar el orden del Sistema Físico con el del DM obtenido y explicar las eventuales diferencias.

4. Desarrollo en el laboratorio

En los siguientes puntos se utilizará Power Dynamo como herramienta de edición, parametrización y causalización de los Diagramas Mixtos, limitándose el uso de Simulink para la simulación y el eventual ajuste de algún parámetro sobre los diagramas de bloques resultantes. Así, para simplificar el trabajo, se aconseja agregar los bloques de salida (To Workspace) y de entrada (Steps) directamente al DM.

Cuando no se indique lo contrario, deberán utilizarse los valores nominales de tensión de armadura y excitación.

4.1. Simulación del motor aislado.

4.1.1. Editar en Power Dynamo el modelo del motor solo (en vacío). Causalizarlo (automáticamente) y generar un modelo Simulink. Simular el arranque del mismo. Utilizar en el arranque algún método para que

la corriente de armadura no supere nunca los 200 A y que la velocidad no resulte nunca mayor que 70 rad/seg. Visualizar ambas variables y el flujo de excitación.

4.2. Simulación del Puente Grúa aislado.

4.2.1. Editar en Power Dynamo el modelo del puente grúa solo, considerando que el mismo es impulsado por una fuerza F aplicada al carro. Simular y observar la evolución de las diferentes variables para los valores $F = 3 \times 10^4 \text{ N}$ y $F = 3 \times 10^8 \text{ N}$. Explicar físicamente que ocurre en el último caso y, en caso de ocurrir algún problema con la simulación, analizar si este se debe a alguna limitación del modelo o bien a una limitación numérica.

4.3. Simulación del Sistema Motor-Puente Grúa en lazo abierto.

4.3.1. Acoplar el modelo del motor con el modelo del puente grúa. Indicar si es posible realizar este acoplamiento con los modelos previamente causalizados. ¿Por qué?. Simular y verificar, al igual que en el punto 4.1.1, que la corriente no supere la nominal. Observar, además de las variables del motor, la evolución de la posición horizontal de la carga y de la longitud del cable.

4.3.2. Modificar la trayectoria de la tensión de armadura $U_a(t)$ para que esta se anule después de cierto tiempo consiguiéndose así que la carga finalice a 15 mts de su condición inicial. Verificar nuevamente que la corriente no crezca por encima de los 200 A.

4.3.3. Agregar en el DM el efecto de la fuerza del viento sobre la carga. Suponer que el mismo provoca una fuerza de 3000 N en la dirección horizontal del movimiento de dicha carga. Observar la evolución de la posición de la carga. Extraer conclusiones sobre la conveniencia de la estrategia de control implementada.

4.4. Control en lazo cerrado.

La solución al problema evidenciado en el punto anterior es la utilización de control por retroalimentación. La idea básica consiste en medir la variable que se quiere controlar (puede ser más de una variable) y eventualmente algunas variables extras. La variable a controlar se compara luego con la referencia deseada y en base al error, se modifica la entrada del sistema siguiendo alguna ley. El esquema más simple es el control proporcional, en el cual la entrada resulta proporcional a dicho error.

4.4.1. Modificar el DM agregando un control proporcional que calcule la tensión de armadura según la ley $U_a = k_p (x_{ref} - x)$ donde x es la posición de la carga y x_{ref} es una entrada de referencia (en nuestro caso deberá ser de 15 mts). Simular y observar que ocurre con la posición de la carga, la velocidad del motor y por último con la corriente de armadura para los casos $k_p=3$, $k_p=30$ y $k_p=100$

4.4.2. Una simple alternativa para solucionar los inconvenientes observados en el caso previo es el uso de una referencia suave, de forma tal que no se produzcan picos excesivos de corriente. Para realizar esto, utilizar una rampa en x_{ref} y observar que ocurre para los distintos valores de k_p . Elegir el que considere que es el valor más adecuado para k_p y para la pendiente.

4.4.3. Agregar nuevamente el efecto del viento y observar como se comporta el sistema. Comparar este resultado con lo observado en el punto 4.3.3.

5. Referencias.

[1] Karnopp, Dean and Ronald Rosenberg (1983). *Introduction to Physical System Dynamics*. N.Y: McGraw-Hill.

[2] Junco, Sergio (1986). *Los Diagramas de Enlaces y un Eficaz Método Estructurado de Modelado Analítico de Sistemas Dinámicos*. Anales del 2do. Congreso Latinoamericano de Control Automático, Buenos Aires, Octubre 1986.

[3] Kofman, Ernesto (1998). *Power-Dynamo: Un Entorno de Modelización de Sistemas Dinámicos Asistida por Computadora*. Proyecto Final de Ingeniería. FCEIA-UNR.

[4] Kofman, Ernesto y Sergio Junco (1999). *Un ambiente computacional para la modelización de sistemas dinámicos no lineales con Bond Graphs*. En Proc. de RPIC'99. Mar del Plata, Argentina.