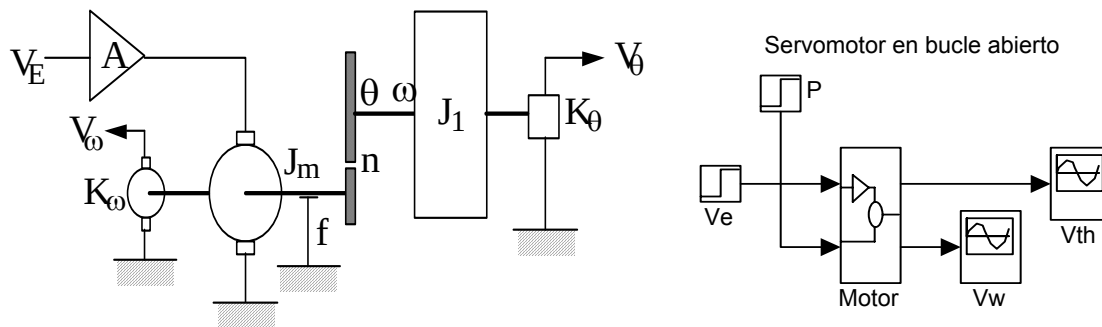


1.1 Experimentación y simulación con un servomecanismo

El objetivo de esta práctica es tener un primer contacto con un sistema real, observando y midiendo su comportamiento dinámico, y comparando los resultados con los obtenidos por simulación. Se identifica el sistema (en bucle abierto), y también se realiza un control muy básico de una de sus salidas (en bucle cerrado). Durante la mitad de la práctica se trabajará con el sistema real, y durante la otra mitad con el sistema simulado, por lo que **es necesario tomar buena nota de las respuestas a las cuestiones, sobre todo de las indicadas en negrita**.

Estudio previo



El servomecanismo consta de un amplificador de potencia que alimenta un motor de corriente continua controlado por inducido. Este motor, a través de un tren de engranajes, mueve el eje controlado, que consta de un volante de inercia. Un par de frenado aplicado sobre la carga se puede modelar como una perturbación aditiva, P , sobre el par motor. Para permitir el control de dicho sistema se dispone de dos sensores, un potenciómetro acoplado al eje controlado y una dinamo tacométrica sobre el eje del motor.

Los valores numéricos de los parámetros del sistema son:

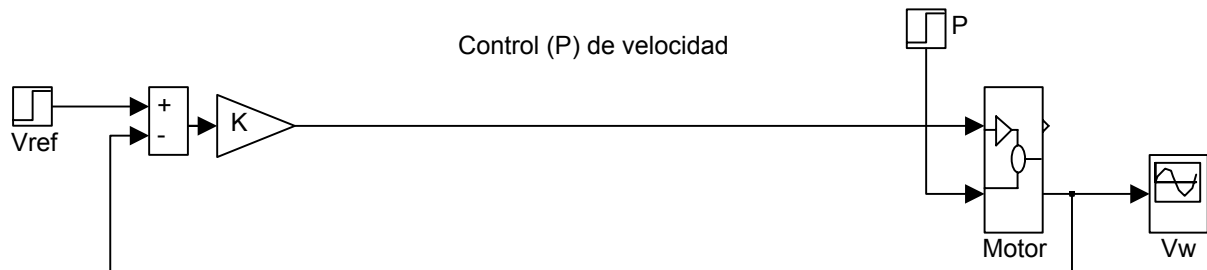
$A = 2.7$	Ganancia del amplificador de potencia
$R = 2.79 \, \Omega$	Resistencia de inducido del motor
$K_p = 0.0729 \, \text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$	Constante de par del motor
$K_e = 0.0731 \, \text{V}/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	Constante eléctrica del motor
$n = 119.78$	Relación de reducción
f despreciable $\approx 0 \, \text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	Fricción viscosa sobre el eje del motor
$J = 1.042 \cdot 10^{-4} \, \text{Kg}\cdot\text{m}^2$	Inercia total referida al eje del motor ($J_m + J_1/n^2$)
$K_\theta = 2.752 \, \text{V}/\text{rad}$	Constante del potenciómetro acoplado al eje controlado
$K_\omega = 2.78 \cdot 10^{-2} \, \text{V}/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	Constante de la dinamo tacométrica acoplada al eje del motor

El motor en bucle abierto, tiene como entradas V_e y el par de freno P , y como salidas V_θ y V_ω .

P1. Modelar el motor mediante un diagrama de bloques. Simplificarlo para obtener las funciones de transferencia V_ω/V_e y V_θ/V_e . Obtener en ambos casos los valores numéricos de la ganancia estática y la constante de tiempo. ¿Cuánto vale la ganancia estática de V_ω/P ?

P2. Dibujar la evolución de las salidas V_ω y V_θ ante un escalón en V_e de amplitud 6 V.

Para controlar la velocidad del servomotor se realimenta su medida V_ω :



P3. Obtener la función de transferencia V_ω/V_{ref} (en función de K) y la ganancia estática de V_ω/P (idem).

Sesión de laboratorio

1. Trabajo con la maqueta del servomotor

1.0. Breve descripción del material de prácticas

Generador de onda y osciloscopio digital: Para la generación de entradas se dispone de generadores de onda en los que puede ajustarse el tipo de onda (cuadrada, triangular, sinusoidal), la frecuencia, la amplitud, y el *offset* (nivel de continua). Para la medición de las señales se dispone de osciloscopios digitales con dos canales.

Cajas de reguladores analógicos: Para realizar el control realimentado se dispone de cajas de reguladores analógicos (electrónicos) que permiten construir y ajustar los reguladores habituales. En cada caja se dispone de dos líneas, cada una de las cuales consta de comparador, etapa proporcional, etapa integral, y dos etapas de avance/retraso de fase. Por saturación de los amplificadores operacionales, la acción (tensión) máxima que puede obtenerse es de 10 V.

1.1 Identificación de la planta

Para observar la respuesta del sistema ante un escalón, se introduce a la entrada una onda cuadrada de la amplitud deseada y con la frecuencia adecuada para que a la salida le dé tiempo a alcanzar el permanente durante un semiperiodo. Es conveniente visualizar, con el osciloscopio, tanto la señal de salida como la de entrada.

Introduce en V_e una onda cuadrada entre 0 y 6 V de la frecuencia adecuada y observa cómo evoluciona el sistema.

Utiliza una sonda del osciloscopio para medir V_ω . Sobre dicha salida, **mide los siguientes parámetros:**

- **ganancia estática** en voltios (i.e.: valor de la salida en régimen permanente dividido por la amplitud del escalón)
- **tiempo de respuesta** en segundos (i.e.: tiempo que tarda la salida en alcanzar la banda del $\pm 5\%$ respecto al valor en régimen permanente de la salida, y mantenerse en esa banda)
- **tiempo que tarda el sistema en llegar al 63% de la salida en régimen permanente**
- **¿qué velocidad angular alcanza la inercia en régimen permanente?**
- si se frena el eje lento, con la mano, con cuidado: **¿se ve afectada la velocidad?**

Otro aspecto a considerar es la linealidad del sistema. Para ello lo mejor es dibujar la característica tensión-velocidad del motor (V_ω frente a V_e), para lo que necesitas medir la velocidad que se alcanza en régimen permanente para varias entradas V_e continuas entre -5 y 5 V (puedes generar una tensión continua con el generador de tensión de la maqueta, en la caja de conexiones abajo a la derecha). Introduce tensiones pequeñas para observar la zona muerta del motor. ¿Satura el sistema con tensiones de entrada grandes? **Dibuja la característica tensión-velocidad del motor, mostrando claramente las no linealidades observadas, e indicando siempre las unidades y los rangos utilizados.**

También estamos interesados en analizar la otra salida del sistema, V_θ . Para ello, vuelve a introducir en V_e una onda cuadrada entre 0 y 6 V de la frecuencia adecuada, y observa la respuesta al escalón de la posición (salida V_θ). ¿Qué sucede? ¿Qué régimen permanente se alcanza? ¿Te parece un comportamiento adecuado? **Mide las características que te parezcan más relevantes en la salida, y dibuja la respuesta al escalón de la posición (salida V_θ) (recuerda indicar las magnitudes y las unidades físicas).**

1.2 Control de la velocidad V_ω

Utilizando la caja de reguladores analógicos (el comparador y la etapa proporcional), cablear el esquema de control de velocidad del apartado P3 del estudio previo.

Introducir en V_{ref} una onda cuadrada entre 0 y 1 V de la frecuencia adecuada. Observar la respuesta V_ω al escalón unitario de V_{ref} , con distintos valores de K (1, 10, 100). **Explicar cualitativamente la variación del comportamiento del sistema realimentado. Anotar para cada valor de K el valor que alcanza V_ω en régimen permanente.**

Dejar $K=100$, e introducir como V_{ref} la salida del generador de tensión de la maqueta. Mientras se hacen los siguientes experimentos, visualizar simultáneamente V_{ref} y V_ω . Observar que V_ω prácticamente alcanza el valor de V_{ref} , para cualquier valor de V_{ref} , es decir, variando V_{ref} (*referencia* de velocidad) se consigue que el motor gire a la velocidad deseada. **Observar qué sucede ahora si se frena el eje lento, con la mano, con cuidado: ¿se ve afectada la velocidad? Probar también con $K=1$ y $K=10$. ¿Qué se observa?**

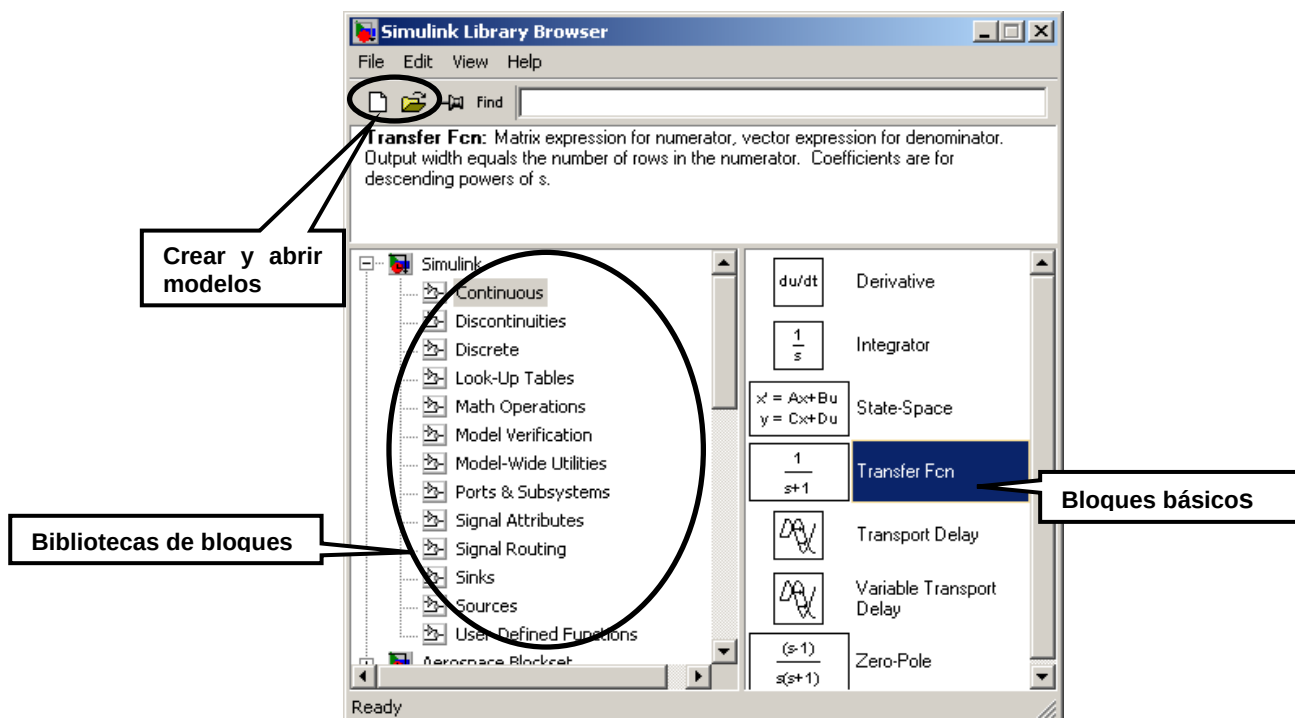
2. Simulación del servomotor

2.0. Introducción a SIMULINK para la simulación de sistemas

Simulink es una extensión de MATLAB, que facilita el análisis y la simulación de sistemas dinámicos. Proporciona un entorno gráfico sobre el que se pueden representar diagramas de bloques. Incluye bibliotecas con señales de entrada, dispositivos gráficos para representar datos, sistemas lineales, y no lineales, funciones matemáticas, etc.

Se inicia desde el icono "Simulink"  de la ventana de MATLAB, o tecleando simulink en la ventana de comandos.

Dentro de Simulink se pueden utilizar parámetros dándoles valor en la ventana de MATLAB.



El método general para trabajar con SIMULINK es el siguiente:

1. Seleccionar **New Model** del menú **File** de la barra de la ventana de MATLAB.
2. Abrir la biblioteca de bloques que se necesite haciendo doble clic sobre su icono y arrastrar los bloques deseados a la ventana de tu modelo. En general necesitaremos, al menos:
 - un bloque "función de transferencia" (**Transfer Fcn**). Para sistemas analógicos está en la biblioteca **Continuous**)
 - un bloque "entrada" (están en la biblioteca **Sources**). Por ejemplo **Step** para simular entrada escalón
 - un bloque para "recoger" la salida (están en la biblioteca **Sinks**). Por ejemplo, **Scope** para representarla, o **To Workspace** indicar el nombre de la variable de MATLAB donde guardarla.
3. Cambiar los parámetros de los bloques a conveniencia editando su caja de diálogo, que se obtiene haciendo doble-clic en el icono del bloque. Los parámetros, en general, pueden ser cualquier expresión legal de MATLAB, incluyendo variables (existentes, claro). Los bloques pueden moverse (arrastrándolos), rotarse, ocultar su nombre, etc. (todas estas acciones se hacen escogiendo la opción correspondiente del menú **Format**).

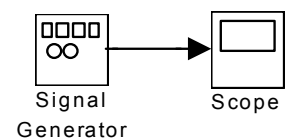
- Conectar los bloques por medio de líneas. Para ello se pulsa el botón izquierdo de ratón y se arrastra desde la salida de un bloque a la entrada de otro. Las conexiones quebradas se pueden dibujar "por tramos". Para sacar una derivación de una línea, pincha sobre ella con el botón alternativo del ratón.
- Ejecutar una simulación seleccionando **Start** del menú **Simulation** (o pulsando el botón **Play**). Los parámetros de simulación (especialmente el tiempo total de simulación) deben ajustarse en la caja de diálogo **Simulation Parameters** (opción **Parameters** del menú **Simulation**).

Otro parámetro que suele ser preciso ajustar es el paso utilizado en la simulación. En general, SIMULINK tiende a tomar los pasos de simulación tan grandes como puede sin perder precisión, sin tener en cuenta que pasos demasiado grandes producen insuficientes puntos para obtener una gráfica razonable de la señal. Cuando falla el ajuste automático, hay que ajustar **Max Step Size** a algo entre la décima y la centésima parte de un "tiempo característico" (como el tiempo de respuesta).

- No olvides salvar de vez en cuando.

Operaciones básicas de simulación

Edita el siguiente modelo, y trata de simular unos pocos periodos de $10 \cdot \sin(200t)$, después de pensar qué se supone que debería obtenerse. Necesitarás ajustar convenientemente los parámetros de **Signal Generator**, tal vez de **Scope**, y desde luego los de **Simulation Parameters**.



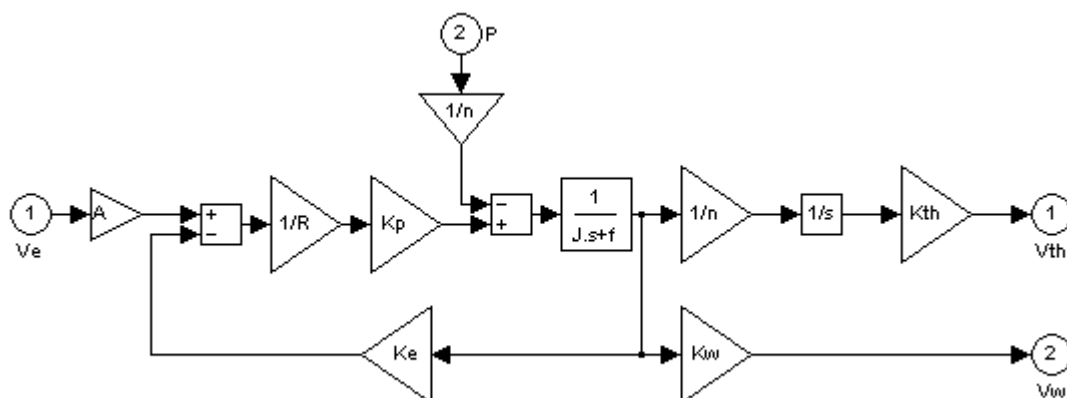
Aparte de otros ajustes, prueba los siguientes (en **Simulation Parameters**):

- **Max Step Size** 0.01
- **Max Step Size** $1e-3$.

2.1. Identificación de la planta

En esta parte de la práctica se utilizará el fichero `sm_def.m`, que contiene las definiciones de las constantes del sistema. Cópialo del directorio de prácticas y asegúrate de establecer el camino de búsqueda para indicarle a MATLAB donde está.

El siguiente paso es construir un modelo del sistema para que podamos usarlo en cualquier simulación a realizar. Utilizando ganancias, sumadores, bloques de función de transferencia, y bloques *inport* y *outport*, construye un modelo que sea más o menos como la siguiente figura:



Graba el modelo recién creado con el nombre 'motor.mdl'.

Con las entradas y salidas definidas, vas a extraer el modelo lineal del sistema empleando `linmod`. Tras ejecutar `sm_def` para cargar en el entorno de MATLAB los valores de las constantes físicas del motor, el primer paso es obtener el modelo en espacio de estados (descripción interna) haciendo:

```
>> [AA, BB, CC, DD]=linmod('motor')      (modelo en el espacio de estados)
```

Para pasar a funciones de transferencia (con respecto a la entrada 1, V_e) se puede hacer:

```
>> [num1,den1]=ss2tf(AA, BB, CC, DD, 1)  (funciones de transferencia resp.  $V_e$ )
```

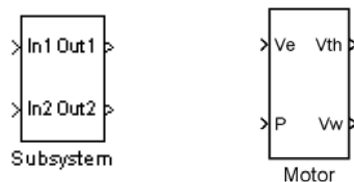
Análogamente para la entrada 2, P :

```
>> [num2,den2]=ss2tf(AA, BB, CC, DD, 2)  (funciones de transferencia resp.  $P$ )
```

Escribe las funciones de transferencia así obtenidas, y compáralas con las calculadas en el estudio previo.

Para poder utilizar ese modelo en otros modelos como un objeto con entradas y salidas, haz los siguientes pasos:

1. elimina los bloques *inport* y *outport*
2. selecciona todo con la opción **Select All** del menú **Edit**
3. usa la opción **Create Subsystem** del menú **Edit**
4. con la opción **Save as...** del menú **File**, graba el resultado con el nombre 'subsistema_motor.mdl'
5. abre el bloque con doble clic para cambiar los nombres de las entradas y salidas a V_e , P , V_{th} y V_w (y si es necesario renumera los bloques *inport* y *outport* haciendo doble clic en ellos)
6. cierra la ventana con el subsistema, con lo que volverás a verlo como una sola caja, y vuelve a grabarlo.



Subsistema motor, antes y después de cambiar los nombres de las entradas

A partir de ahora ya tendrás un archivo que contiene un bloque (subsistema) que podrás utilizar en otros modelos, por ejemplo para identificarlo en bucle abierto, para controlarlo en bucle cerrado, etc. Además, como el subsistema está definido utilizando variables, basta con cambiar su valor en la ventana de comando de MATLAB para tener un sistema ligeramente diferente.

Vas a identificar el sistema. Construye un modelo de Simulink para excitar al sistema con una señal escalón de 6 V en la entrada V_e (dejando P sin conectar). **Mide las características de la respuesta (las mismas que en el apartado 1.1), y dibuja dicha respuesta** (recuerda añadir a la gráfica las magnitudes y sus unidades).

Estudia cómo cambia la respuesta si una vez estabilizado el sistema se produce un par de frenado de 10 N (entrada P). **Mide la respuesta ante P y dibuja la respuesta.**

Sustituye la entrada escalón por una rampa. **¿Cuál es la pendiente de la recta a la que se aproxima la respuesta?**

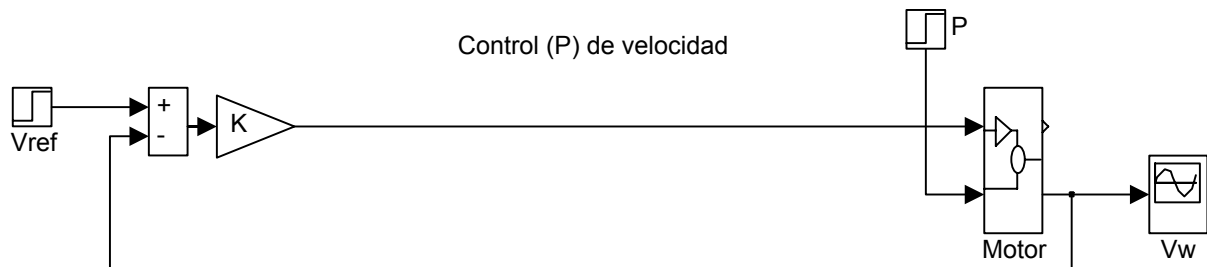
Si conocemos las funciones de transferencia también podemos estudiar las respuestas a un escalón o a un impulso utilizando simplemente MATLAB, con las funciones `step` e `impz`. Para ello hay que crear antes un objeto MATLAB “función de transferencia” a partir de los polinomios del numerador y denominador. Por ejemplo, para definir la función de transferencia V_θ/V_e :

```
>> Posicion_Ve = tf(num1(2,:),den1)
```

Utiliza las funciones `step` e `impz` para dibujar cómo varía V_θ ante entradas escalón e impulso en V_e .

2.2 Control de la velocidad V_ω

Para estudiar cómo cambia el sistema cuando lo controlamos en bucle cerrado, crea un modelo en blanco, y añade el subsistema motor creado antes y el resto de bloques hasta que obtengas algo parecido a la figura adjunta. En V_{ref} introduce una señal escalón de valor 1 (¿a qué velocidad corresponde?)



Simula con $K=1, 10, 100$. Para estudiar cómo se modifica la velocidad del motor en régimen permanente al variar K , **haz una tabla K frente al error entre la salida y la entrada**. Compara los resultados con los obtenidos sobre el sistema real y en el estudio previo.

Añade un par de frenado de 10 N·m (en escalón) que entre una vez estabilizado el sistema, lo que nos permitirá estudiar el efecto de las perturbaciones sobre la velocidad en función de K . **Extrae conclusiones (por escrito) sobre el efecto que sobre el régimen permanente tiene variar la ganancia K del regulador.**