

# Práctica 4

## Selección de Servoaccionamientos

---

### 4.1.-Introducción

La selección de los servoaccionamientos y el modelo los mismos en base a la dinámica inversa de la máquina y catálogos comerciales de motores es un paso clave en el proceso de análisis, simulación o diseño de un robot. La presente práctica pretende mostrar los pasos a seguir para una correcta elección de los actuadores del robot. En primer lugar se requiere un conocimiento previo de los tipos de actuadores. En la práctica 1 se presentó una clasificación de las diferentes tecnologías de actuadores utilizadas en robótica. En esta práctica van a utilizarse los motores eléctricos, y para ello el primer paso es realizar un modelo dinámico que se ajuste al comportamiento real del motor. Este modelo se utilizará en las prácticas siguientes dentro del esquema de control y simulación de robots. Para asignar los valores de las variables que aparezcan en el modelo del actuador se debe utilizar la información proporcionada por los fabricantes de los motores, y para ello el siguiente paso es seleccionar de los catálogos existentes el actuador que se adecue a los requerimientos del robot. Estos requerimientos van a ser los pares máximos que deban ser soportados por el robot.

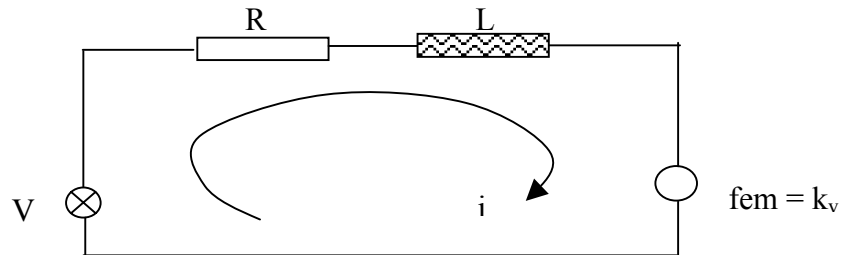
#### ➤ **Objetivos**

- Modelo dinámico de un motor DC: brushless y brush.
- Análisis de la aplicación particular. Robot de 3 grados de libertad.
- Cálculo de los pares máximos requeridos.
- Búsqueda en catálogos comerciales de motores.

## 4.2.- Modelo dinámico de un motor DC

Se va a utilizar un modelo eléctrico válido en régimen permanente.

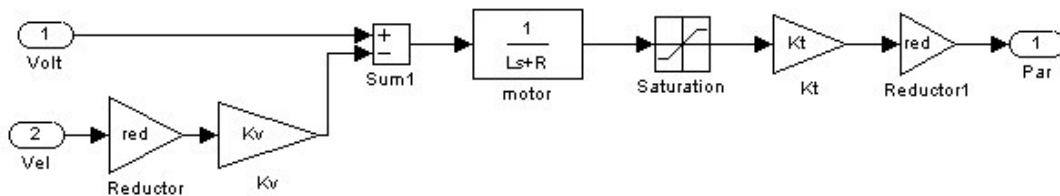
El comportamiento dinámico del motor para régimen permanente se puede representar mediante el siguiente circuito eléctrico, como se observa en la figura y ecuaciones siguientes:



$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + k_v \omega$$

El par del motor es proporcional a la corriente circulante. ( $\tau = k_t i$ )

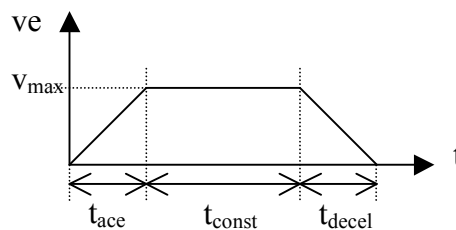
El diagrama de bloques del modelo es el siguiente:



### 4.3.- Cálculo de los pares máximos requeridos

Para seleccionar los motores adecuados para un robot es necesario conocer los requerimientos máximos a los cuales van a estar sometidos los motores. Para ello se sitúa el robot en su peor configuración y se le aplica un perfil de velocidad trapezoidal a cada una de las articulaciones para obtener, utilizando la dinámica inversa del robot, el par pico y el par nominal de cada motor. Un perfil de velocidad trapezoidal se caracteriza por la gráfica que se muestra en la figura 4.1. El perfil de velocidad se divide en tres intervalos:

- Intervalo de aceleración ( $t_{acel}$ ): Durante este tiempo se introduce a la articulación la aceleración máxima a la que va a estar sometida hasta alcanzar la velocidad máxima a la que puede operar. El par pico se obtendrá, utilizando la dinámica inversa, cuando se introduzca a la articulación la velocidad máxima y la aceleración máxima.
- Intervalo constante ( $t_{const}$ ): Durante este tiempo se introduce a la articulación la velocidad máxima a la que va a estar sometida considerando aceleración nula. El par nominal corresponderá al par producido en estas condiciones utilizando la dinámica inversa.
- Intervalo de deceleración ( $t_{decel}$ ): Durante este intervalo se introduce a la articulación una deceleración hasta alcanzar una velocidad nula.



**Figura 4.1.** Perfil de velocidad trapezoidal.

Los pares obtenidos mediante la dinámica inversa son divididos por el reductor seleccionado para cada motor. La elección del reductor vendrá determinada por la velocidad máxima permitida para el accionamiento y por las revoluciones a las que trabaje el motor. Por último hay que señalar que, generalmente, la relación entre el par nominal y el par pico es del orden de 3~4 en los motores brushless.

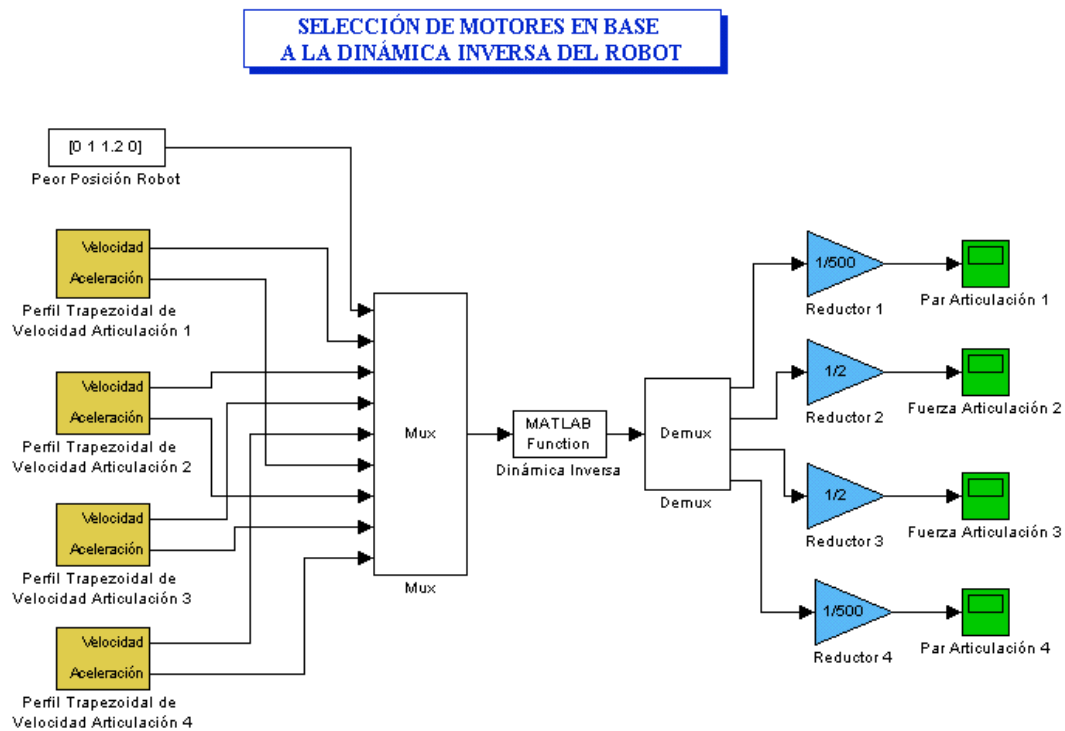
#### Ejemplo 4.1

---

#### Cálculo de los pares máximos requeridos para el robot de 4gdl.

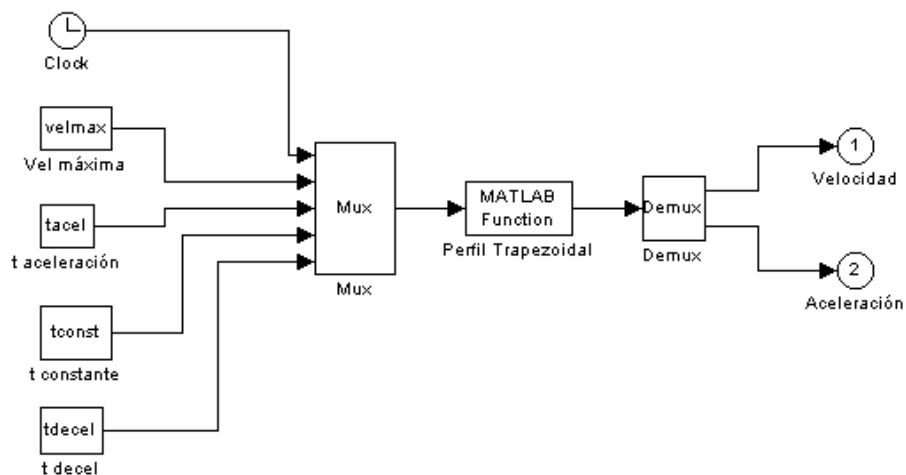
Para calcular los pares máximos requeridos de cada articulación se ha desarrollado una herramienta en Simulink que, especificando la peor posición en la que puede encontrarse el robot y el perfil de velocidad que se le aplica a cada articulación, se obtiene una gráfica del par o fuerza de la articulación. En esta gráfica aparece tanto el par o fuerza pico como el par o fuerza nominal. El fichero en el que se encuentra

implementada la herramienta se denomina *selmotor4.mdl*. Si se ejecuta desde el entorno de Matlab® “*selmotor4*” aparecerá en pantalla la herramienta descrita anteriormente, que se muestra en la figura 4.2.



**Figura 4.2.** Herramienta desarrollada en Simulink para calcular el par o fuerza pico y nominal de cada articulación.

Para generar el perfil de velocidad trapezoidal se ha creado el subsistema que se muestra en la figura 4.3. Para tener acceso a dicho subsistema es necesario seleccionar el bloque y elegir la opción *Look Under Mask* del menú *Edit* de Simulink®.



**Figura 4.3.** Subsistema Perfil de Velocidad Trapezoidal.

El subsistema mostrado en la figura 4.3 hace uso de una función desarrollada en Matlab® *trapezoidal.m*. Esta función sirve para generar la velocidad y aceleración de la articulación en cada instante de tiempo según los parámetros elegidos del perfil de velocidad, que recordemos que son la velocidad máxima, el tiempo de aceleración, el tiempo constante y el tiempo de deceleración. El código fuente de esta función se muestra a continuación:

```
% TRAPEZOIDAL Perfil de velocidad trapezoidal
% PERFIL=TRAPEZOIDAL(U) devuelve un vector 1x2 que contiene la velocidad
% y la aceleración de un perfil de velocidad trapezoidal en un determinado
% instante de tiempo. PERFIL(1) contiene la velocidad y PERFIL(2) la
% aceleración. U(1) representa el instante de tiempo actual(seg). U(2) es
% la velocidad máxima. U(3) es el tiempo de aceleración(seg). U(4) es el
% tiempo de velocidad constante(seg). U(5) es el tiempo de
% deceleración(seg).

function perfil=trapezoidal(u)

t      = u(1);   % Instante de tiempo actual
velmax = u(2);   % Velocidad máxima
taccel = u(3);   % Tiempo de aceleración
tconst = u(4);   % Tiempo de velocidad constante
tdecel = u(5);   % Tiempo de deceleración

% Se calcula la velocidad y la aceleración
if t <= taccel
    % Intervalo de aceleración
    acel = velmax/taccel;
    vel  = acel*t;
else
    if t < (taccel+tconst)
        % Intervalo de velocidad constante
        vel  = velmax;
        acel = 0;
    else
        if t > (taccel+tconst+tdecel)
            % Velocidad y aceleración nula
            vel  = 0;
            acel = 0;
        else
            % Intervalo de deceleración
            acel = -velmax/tdecel;
            vel  = velmax+acel*(t-taccel-tconst);
        end
    end
end

% Se devuelve la velocidad y la aceleración
perfil = [vel acel];
```

Para obtener el par o fuerza de cada articulación se ha desarrollado en Matlab® la función *dininv4gdl.m*; que calcula el par o fuerza de cada articulación cuando el robot transporta una determinada carga en función de la posición, velocidad y aceleración de cada articulación. Esta función hace uso de la función *newtoneuler4.m*, explicada en la práctica 3. El código fuente de *dininv4gdl.m* se muestra a continuación:

```
% DININV4GDL Dinámica inversa de un robot de 4GDL.
% PAR = DININV4GDL(ENTRADA) calcula el vector 4x1 de pares/fuerzas de
% entrada a las articulaciones utilizando el método de Newton-Euler.
% ENTRADA(1:4) representa la posición de cada articulación.
% ENTRADA(5:8) es la velocidad de cada articulación. ENTRADA(9:12)
% es la aceleración de cada articulación.
%
% See also NEWTONEULER4.

function par = dininv4gld(entrada)

q   = entrada(1:4);    % Posición de cada articulación
qp  = entrada(5:8);    % Velocidad de cada articulación
qpp = entrada(9:12);  % Aceleración de cada articulación

% Parámetros de la carga
masaext = 10;
inerciaext = [0.0167 0 0;0 0.0167 0;0 0 0.0167];

% Se calcula el vector de pares/fuerzas utilizando Newton-Euler
par = newtoneuler4(q,qp,qpp,9.8,masaext,inerciaext);
```

Una vez presentada la herramienta, así como los ficheros que se van a utilizar para calcular los pares y fuerzas pico y nominal de cada articulación, se va a proceder a obtener estos pares y fuerzas en el caso del robot de 4 GDL.

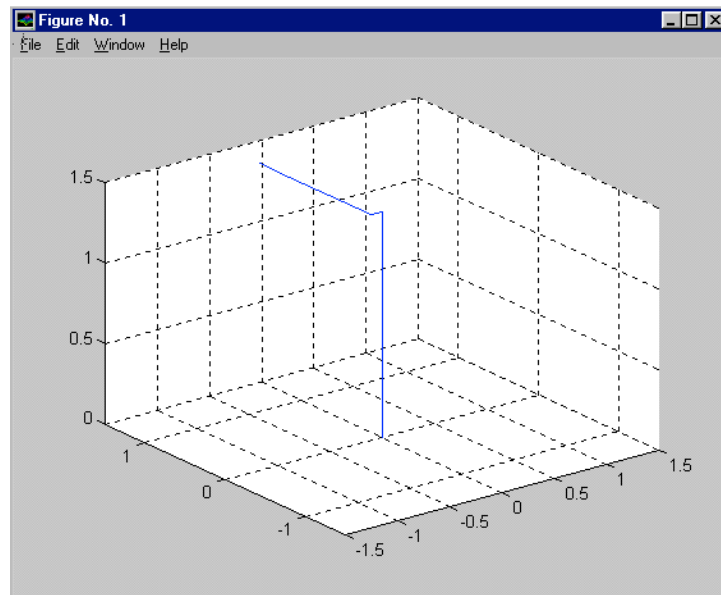
En primer lugar hay que destacar que la peor posición en la que se puede encontrar el robot se produce cuando las dos articulaciones prismáticas han alcanzado su valor máximo. Se considerará que el valor máximo de la segunda articulación ( $q_2$ ) es de 1m, mientras que el de la tercera ( $q_3$ ) es de 1.2m. El valor de la primera y cuarta articulación no influye en el cálculo de los pares/fuerzas máximas. Por lo tanto, por comodidad, la peor posición del robot vendrá dada por:

$$q = (0 \quad 1 \quad 1.2 \quad 0)$$

Para ver la configuración del robot en la peor posición podemos utilizar la función drawrobot3d4 que vimos en la práctica 2:

```
» drawrobot3d4([0 1 1.2 0]')
```

*La ejecución de la función anterior muestra, efectivamente, que el vector de coordenadas articulares anterior corresponde a la peor disposición del robot, como se puede apreciar en la figura 4.4.*



**Figura 4.4.** Peor disposición del robot. Se obtiene al ejecutar `drawrobot3d4([0 1 1.2 0])`.

Como ya se ha comentado anteriormente, los parámetros que caracterizan a un perfil de velocidad trapezoidal son:

- Velocidad máxima
- Tiempo de aceleración
- Tiempo constante
- Tiempo de deceleración

Para el caso del robot de 4 GDL se va a suponer que la velocidad máxima para las articulaciones rotacionales es de  $\pi/3$  rad/s, mientras que en el caso de las prismáticas es de 1 m/s. Se va a considerar que el tiempo de aceleración es 0.1 segundos, lo que quiere decir que se dispone de 0.1 segundos para alcanzar la velocidad máxima. Como tiempo constante se va a tomar 0.4 segundos y como tiempo de deceleración 0.1 segundos. Es importante destacar que en función de la articulación se considerará la velocidad máxima positiva o negativa. En el caso de las articulaciones 1 y 4 es independiente considerar la velocidad máxima positiva o negativa, ya que a efectos de requerimientos de par, no hay diferencia en girar la articulación en un sentido o en otro. Para la obtención de los pares pico y nominal se ha considerado la velocidad máxima positiva. En las articulaciones 2 y 3 los mayores requerimientos de par se producirán cuando la articulación se desplace en el sentido positivo del eje z. Por lo tanto, para ambas articulaciones se ha considerado la velocidad máxima positiva. Ver figura 4.5.

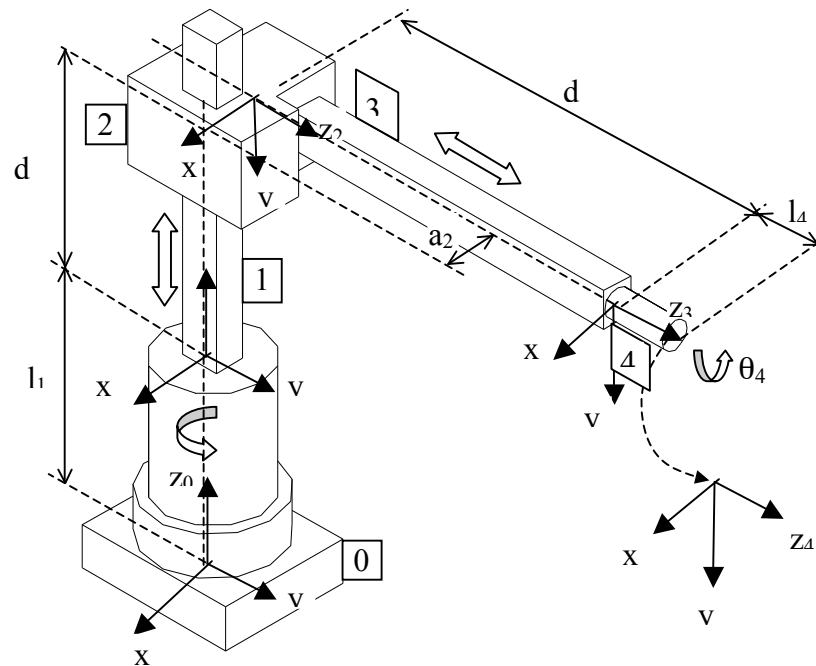


Figura 4.5. Robot de 4 GDL.

Para las articulaciones rotacionales se van a utilizar reductores de 500, ya que suponemos que se van a utilizar motores que trabajan a 5000 rpm. Esto se debe que la velocidad máxima permitida es de  $\pi/3$  rad/s, o sea 10 rpm, por lo que si se utilizan motores que funcionan a 5000 rpm, se obtiene un factor de reducción de  $5000/10=500$ . Este factor puede ser comercialmente obtenido colocando en serie un reductor de 200 por piñones y un reductor de factor 1:2.5 obtenido por transmisión de correa.

Para las articulaciones prismáticas se usarán, como reductores, husillos de bolas de paso 25 mm. Para calcular el factor de reducción en primer lugar es necesario obtener las rpm que corresponden a la velocidad máxima de las articulaciones prismáticas. Para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{v}{p} \times 60$$

donde  $v$  es la máxima velocidad (mm/s) y  $p$  es el paso del husillo (mm). Puesto que la máxima velocidad de las articulaciones prismáticas es de 1000 mm/s y el paso del husillo es 25 mm, se obtiene que la velocidad máxima es de 2400 rpm. Por tanto si se utilizan motores que funcionan a 5000 rpm, se obtiene un factor de reducción de  $5000/2400 \approx 2$ .

Para obtener los pares y fuerzas de los motores teniendo en cuenta los reductores que se van a emplear, únicamente, como se muestra en la figura 4.2, es necesario dividir el par/fuerza proporcionado por la dinámica inversa por el valor del reductor.

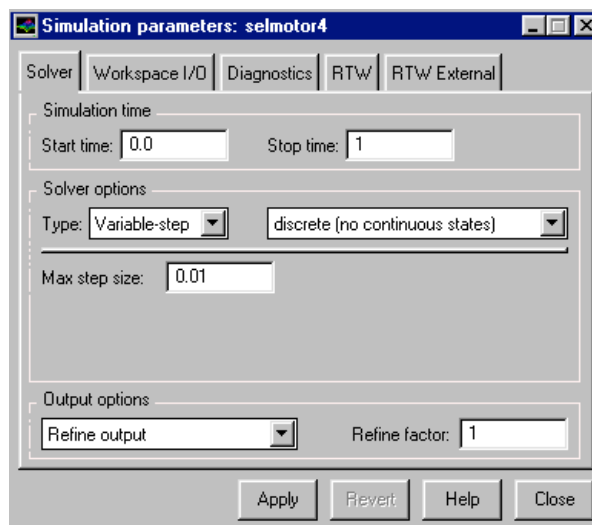
*Para obtener los pares máximos requeridos hay que considerar que el robot tiene en su extremo la máxima carga permitida. Para nuestro robot hemos considerado que la carga máxima es de 10 Kg y que su matriz de inercia es:*



$$Inercia = \begin{bmatrix} 0.0167 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0167 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0167 \end{bmatrix}$$

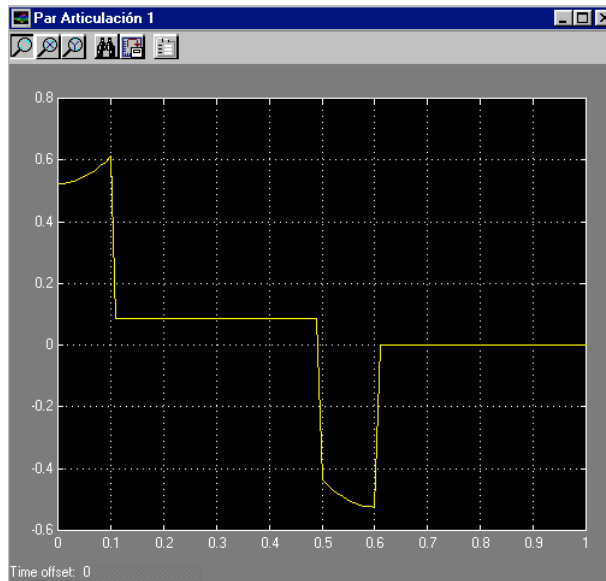
Estas características de la carga externa se especifican en el fichero *dininv4gdl.m*.

Una vez especificadas las características relativas al robot, el siguiente paso es realizar la simulación del modelo desarrollado en Simulink. Pero antes es necesario configurar los parámetros de la simulación. Para ello ejecutamos la opción *Parameters* del menú *Simulation*. Los valores seleccionados de los parámetros son los que se muestran en la figura 4.6.



**Figura 4.6.** Configuración de los parámetros de la simulación.

Para realizar la simulación del modelo desarrollado en Simulink para obtener los pares y fuerzas pico y nominal de cada articulación únicamente debemos ejecutar la opción *Start* del menú *Simulation*. Cuando finalice la simulación podemos pulsar dos veces con el ratón en cualquier gráfica que muestre el par o fuerza de la articulación para obtener su par o fuerza pico y nominal. Por ejemplo, si pulsamos dos veces sobre el bloque correspondiente al par de la articulación 1, obtenemos la gráfica del par de la articulación que se muestra en la figura 4.7. El par pico corresponde al par máximo en valor absoluto que aparece en la gráfica, que en este caso es 0.612 Nm. El par nominal es el valor absoluto del par en el intervalo constante del perfil trapezoidal, cuyo valor es, en este caso, 0.088 Nm.



**Figura 4.7.** Gráfica correspondiente al par de la articulación 1.

En el caso de la cuarta articulación el par pico es  $4.85 \cdot 10^{-4}$  Nm y el par nominal es  $1.05 \cdot 10^{-4}$  Nm.

En la segunda articulación la fuerza pico es 228 N y la nominal es 113 N. En la tercera, la fuerza pico es de  $|-93| = 93$  N y la nominal  $|-12| = 12$  N. Para obtener el par equivalente a una fuerza se utiliza la siguiente fórmula:

$$\tau = \frac{F p}{2\pi n}$$

donde  $F$  es la fuerza (N),  $p$  es el paso del husillo (m) y  $n$  es la eficiencia del husillo.

Suponiendo que la eficiencia del husillo es de 0.85, puesto que el paso del husillo es 0.025 m, los pares pico y nominal de las articulaciones 2 y 3 son:

- Articulación 2: Par pico: 1.0716 Nm; Par nominal: 0.5311 Nm.
- Articulación 3: Par pico:  $|-0.4371|$  Nm; Par nominal:  $|-0.0564|$  Nm.

En la tabla 4.1 se muestran los pares pico y nominal de cada una de las articulaciones del robot de 4 gdl.

Articulación	1	2	3	4
$\tau_{\text{pico}}$ (Nm)	0.612	1.0716	0.4371	$4.85 \cdot 10^{-4}$
$\tau_{\text{nominal}}$ (Nm)	0.088	0.5311	0.0564	$1.05 \cdot 10^{-4}$

**Tabla 4.1.** Par pico y nominal de cada articulación.

Obtención de los datos de los motores

El par pico y nominal obtenido para cada actuador es necesario multiplicarlo por un factor de seguridad de 1.5 antes de proceder a buscar los datos de los motores en catálogos comerciales. A partir de los pares obtenidos al aplicar el factor de seguridad se procede a buscar en catálogos comerciales los datos de los motores que satisfagan los requerimientos de par. Los datos que se deben extraer de los motores son los correspondientes a los parámetros requeridos por el modelo dinámico del motor, ver tabla 4.3.

Parámetro	Símbolo	Unidades
Resistencia	R	Ohms ( $\Omega$ )
Inductancia	L	mH
Constante de par	$K_T$	Nm/A
Constante de voltaje	$K_V$	V/rad/s
Corriente máxima	$I_{m\acute{a}x}$	A

**Tabla 4.3.** Parámetros requeridos por el modelo dinámico del motor.

Obtención de los datos de los motores del robot de 4gdl.

En la tabla 6.4 se muestra el par pico y nominal de cada articulación después de multiplicar los datos mostrados en la tabla 6.1 por el factor de seguridad de 1.5.

Articulación	1	2	3	4
$\tau_{pico}$ (Nm)	0.918	1.6074	0.6556	$7.275 \cdot 10^{-4}$
$\tau_{nominal}$ (Nm)	0.132	0.7967	0.0846	$1.575 \cdot 10^{-4}$

**Tabla 4.4.** Par pico y nominal de cada articulación considerando un factor de seguridad de 1.5.

Se ha considerado que los actuadores del robot corresponden a motores brushless DC. Para obtener los datos de los parámetros de los motores que satisfacen los requerimientos de par especificados en la tabla 4.4 se ha consultado el catálogo de motores brushless DC de *Eastern Air Devices, Inc.* Los valores seleccionados de los parámetros del modelo dinámico del motor se muestran en la tabla 4.5.

Articulación	Nombre Motor	R( $\Omega$ )	L(mH)	$K_T$ (Nm/A)	$K_V$ (V/rad/s)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
1	DA23GBB	0.8	0.93	0.058	0.058	18.5
2	DA34HBB	1.6	1.56	0.176	0.176	23.7
3	DA23GBB	0.8	0.93	0.058	0.058	18.5
4	DB17CDB	6.9	1.28	0.035	0.035	3.6

**Tabla 4.5.** Datos de los motores seleccionados para cada articulación.



### 4.3.- PRACTICA. Robot de 3 grados de libertad.

Se van a estudiar los servoaccionamientos que se emplean en un robot de 3 gdl. El robot de 3 gdl considerado corresponde al robot Mitsubishi PA-10 tomando únicamente sus tres primeras articulaciones. El modelo cinemático y dinámico de este robot se ha desarrollado con las herramientas estudiadas en las prácticas 2 y 3 aplicadas a un robot con los DH indicados en la tabla 4.6.

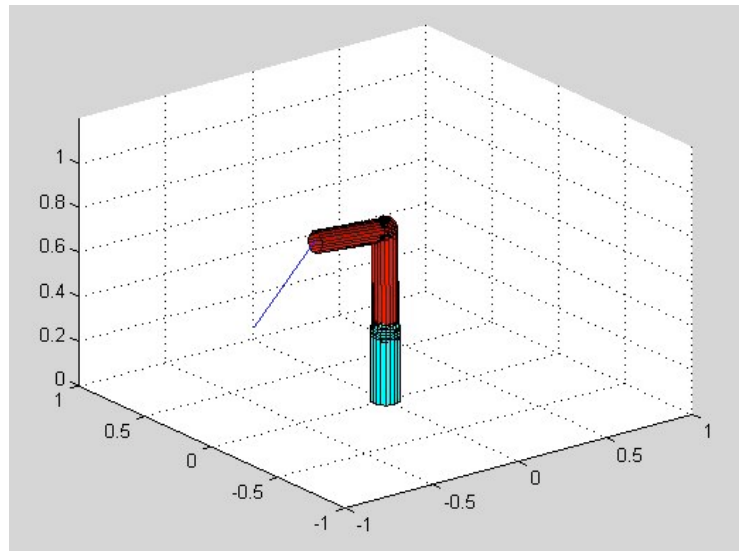


Figura 4.6. Representación del robot de 3 gdl.

#### ❖ cinemática

A continuación se muestra la tabla con los parámetros de Denavit-Hartenberg del robot considerado.

Articulación	$\theta$	$\alpha$	a (mm)	d (mm)
1	$\theta_1 + \pi/2$	$-\pi/2$	0	315
2	$\theta_2$	0	450	0
3	$\theta_3$	0	0	400

Tabla 4.1. Parámetros DH del robot de 3 gdl

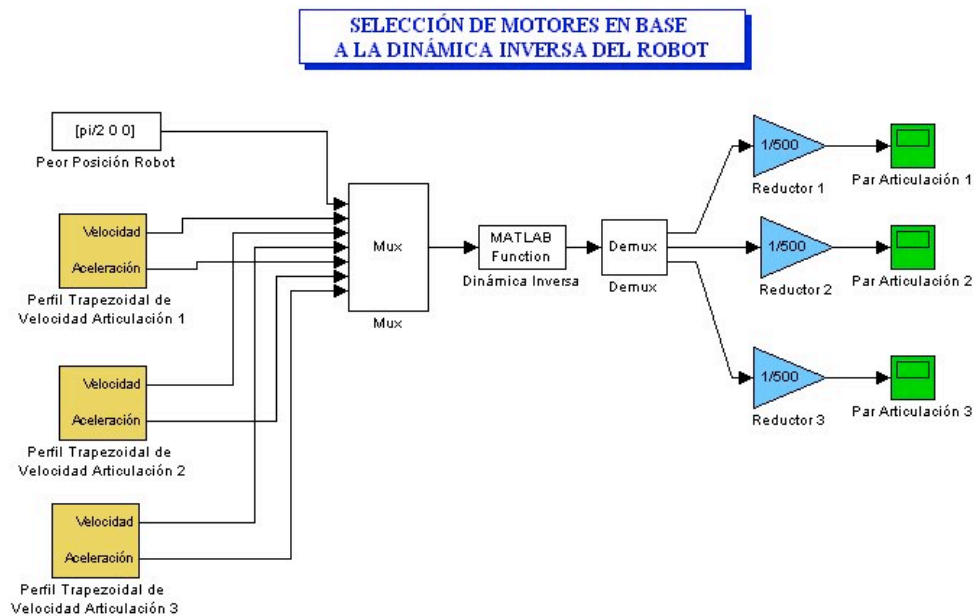
#### ❖ dinámica

Para realizar la dinámica inversa del robot se ha utilizado el método de Newton-Euler, y para la dinámica directa se ha implementado el tercer método de Walker-Orin, ya estudiados

➤ **Cálculo de los pares máximos requeridos.**

Para seleccionar los motores adecuados a la aplicación es necesario conocer los requerimientos máximos a los cuales va a estar sometido el motor. Para ello se coloca al robot en su peor configuración y se aplica un movimiento a las velocidades y aceleraciones máximas permitidas. Se debe calcular por tanto el par nominal y el par pico para cada motor, siendo el nominal a aceleración nula y velocidad máxima y el pico en condiciones de aceleración y velocidad máximas.

Se ha implementado en Simulink una herramienta que nos permite obtener una gráfica de los pares pico y nominal en una determinada posición fija: “*selmotor.mdl*”



Se ha de observar que la relación entre el par nominal y el par pico es del orden de 3~4 en los motores brushless.

En este caso se ha utilizado un reductor de 500, basándonos en que la velocidad máxima permitida para un accionamiento es de  $\pi/3$  rad/seg, y suponiendo que vamos a utilizar motores que trabajan a 5000 rpm se obtiene un factor de reducción de 500. Este factor puede ser comercialmente obtenido colocando en serie un reductor de 200 por piñones y un reductor de factor 1:2.5 obtenido por transmisión de correa.

➤ **Búsqueda en catálogos comerciales de motores.**

Una vez obtenidos los pares nominal y pico para cada actuador, se multiplican estos valores por un factor de seguridad de 1.5, y con estos valores se busca en catálogos comerciales.

## EJERCICIOS PROPUESTOS

---

### Ejercicio 1

Se debe rellenar una tabla como la adjunta en la que figuren los datos requeridos por el modelo dinámico del motor que se ha visto anteriormente y que será el que se utilice en la aplicación del robot.

articulación	nombre motor	$R(\Omega)$	$L(\text{mH})$	$k_t (\text{Nm/A})$	$k_v (\text{V/rad/s})$	$I_{\text{max}} (\text{A})$
1						
2						
3						

Para ello se utilizará los catálogos proporcionados por el profesor durante la sesión de prácticas.

### Ejercicio 2

Implementar las funciones del ejemplo 4.1 para el caso del robot rotacional de 6 gdl mostrado en las prácticas anteriores.