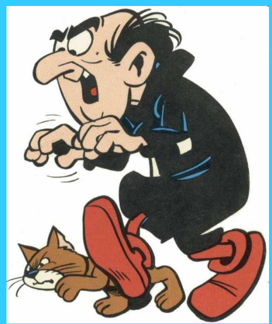
Reflexiones sobre un robot de Eurobot

Este documento sin pretenciones teóricas, se basa en la experiencia adquirida por el equipo RCVA después de 11 años participando en la competición Eurobot.
Este documento no pretende insistir sobre temas ya vistos en el foro de Planete Sciences o documentos de proyectos disponibles en internet.
Por el contrario pretende arrojar una visión diferente y original a problemas específicos que al parecer son escenciales en la construcción de un robot de Eurobot.



Jacques Coulon (Gargamel)

Otoño 2007

Documento traducido por
Asociación de Robótica de Coslada

Índice

Capítulo 1

Repaso de cinemática básica y coeficiente de aderencia

En este capítulo, el objetivo es recordar algunas fórmulas básicas de cinemática y para definir el coeficiente de fricción de los neumáticos sobre el terreno de juego, que es evaluar la resistencia a la tracción máxima aplicada al robot sin deslizar. También se describe un método práctico para medir este coeficiente

Repaso de cinemática

Sólido desplazandose por un eje

Eje de desplazamiento: **x**

Velocidad lineal: **v**

Aceleración lineal: **a**

Sólido rotando alrededor de un eje

Posición angular: **θ** velocidad angular: **ω**
Aceleración angular: **a_rot**

x (m)

v = dx/dt (m/s)

a = dv/dt = d^2x/dt^2 (m/s^2)

θ (rd)
ω = dθ/dt (rd/s)
a_rot = dω/dt = $d^2\theta/dt^2$ (rd/s^2)

Relación fundamental de la mecánica

F = m.a

F: fuerza aplicada
(suma de las fuerzas aplicadas)
m: masa del sólido
a : aceleración del sólido

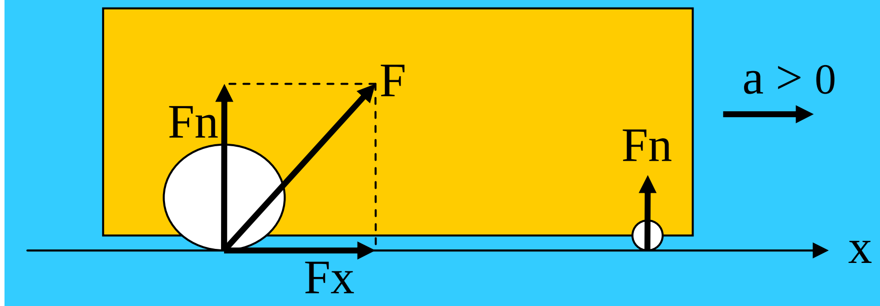
M = J . a_rot

M: momento de la fuerza aplicada (suma de fuerzas de torsiones aplicada)
J : momento de inercia
a_rot: aceleración angular

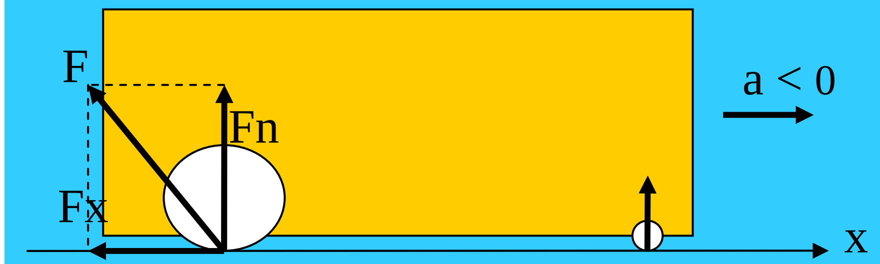
Robot en movimiento en el plano horizontal

Supongamos que el robot funciona con dos ruedas motrices (ver el dibujo)

Robot en fase de aceleración:



Robot en fase de frenado:



Robot a velocidad constante

Fx=0

F: fuerza resultante del suelo en la rueda

Fn: fuerza normal o vertical del suelo en la rueda (opuesta a la fuerza de apoyo debida al peso del robot)

Fx: fuerza de propulsión en la rueda

a = 2.Fx / m **(m: masa del robot)**

El **2** viene de la fuerza que ejercen los dos motores, Esta fórmula sólo es válida si :

Fx<Fxmax

Fxmax corresponde a la fuerza a partir de la cual se produce deslizamiento:

Fxmax=ka.Fn

ka: coeficiente de aderencia de las ruedas contra el suelo.

ka se encuentra entre los límites teóricos 0 y 1

ka=0: aderencia nula

ka=1: aderencia teórica máxima

Para nuestros robots: 0.3<**ka**<1.5

(depende del neumático, de las dimensiones de la banda de rodadura de la rueda y del estado del terreno de juego)

Acerca del coeficiente de aderencia Ka

Y sí, el coeficiente de fricción puede sobrepasar el límite teórico de 1. La resistencia a la tracción puede superar a la fuerza debida al peso ejercida sobre las ruedas en el suelo.
Cuando un piloto de F1 frena a una deceleración de 4g (deceleración de $40 m/s^2$), si no tenemos en cuenta la carga aerodinámicaa, obtendríamos aproximadamente Ka=4, y si tenemos una carga aerodinámica igual al peso del coche, obtenemos aun Ka=2.

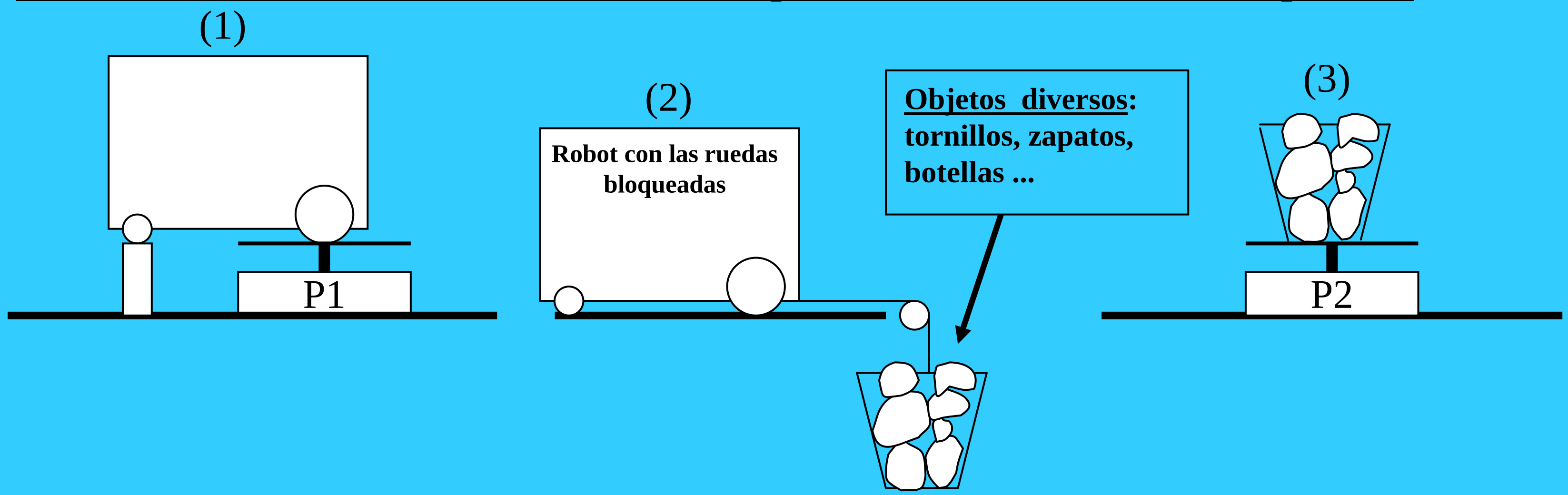
Para un vehiculo de pasajeros, el coeficiente medio de fricción en las carreteras secas es en torno a 1 y baja a 0,7 en húmedo.
Para un robot de Eurobot, depende del tipo de neumático utilizado y de la calidad del campo de juego.
Se puede utilizar un neumático consistente en una sola junta tórica cosiguiendo una Ka con un valor inferior a 0,5 o bien utilizar unos neumáticos de caucho de baja dureza (entre 20 y 30 shores) con el cual se puede conseguir una Ka entorno a 1.

Es posible medir este coeficiente, con el método desarrollado en la siguiente página, se ha creado con motivo de desarrollar este documento.
Este método práctico requiere de la más alta tecnología ya que requiere los siquientes equipos (xD):

- Una báscula de bebé
- Una cuerda
- Una polea
- Un cubo

La dificultad está ahora en bloquear las ruedas mecánicamente sujetandolas con el chasis (este problema se ve solucionado si el robot cuenta con un freno de mano ☺)

Determinación del coeficiente de aderencia por el método del cubo en suspensión



(1) Apollar las ruedas sobre la báscula y mantener el robot horizontal con un espaciador apollado sobre el roll-on. **P1** mide la fuerza con la que las dos ruedas apollan en el suelo.

(2) Carga el cubo hasta que las ruedas (bloqueadas al chasis) empiezen a deslizar (la cuerda ha de estar unida al robot lo más abajo posible).

(3) Se mide el peso del cubo con su carga. **P2** mide la fuerza de tracción máxima en el límite de patinaje.

Obtenemos el coeficiente de aderencia como: **Ka=P2/P1**

Resultados:

Al robot se le redujo el peso, por lo que se obtuvieron dos medidas del coeficiente:

Robot ligero: P1=7.55 kg P2= 7.90 kg ka=1.04

Robot pesado P1=14.65 kg P2=13.5 kg ka= 0.92

Normalmente Ka es indepentiente del peso del robot. Esto no es del todo cierto en el método, pero hay que incluirlo en los errores de medición, en torno al +-1 zapato aproximadamente XD.

Se puede observar el orden de magnitud grande de Ka (en torno a 1 en nuestro caso).

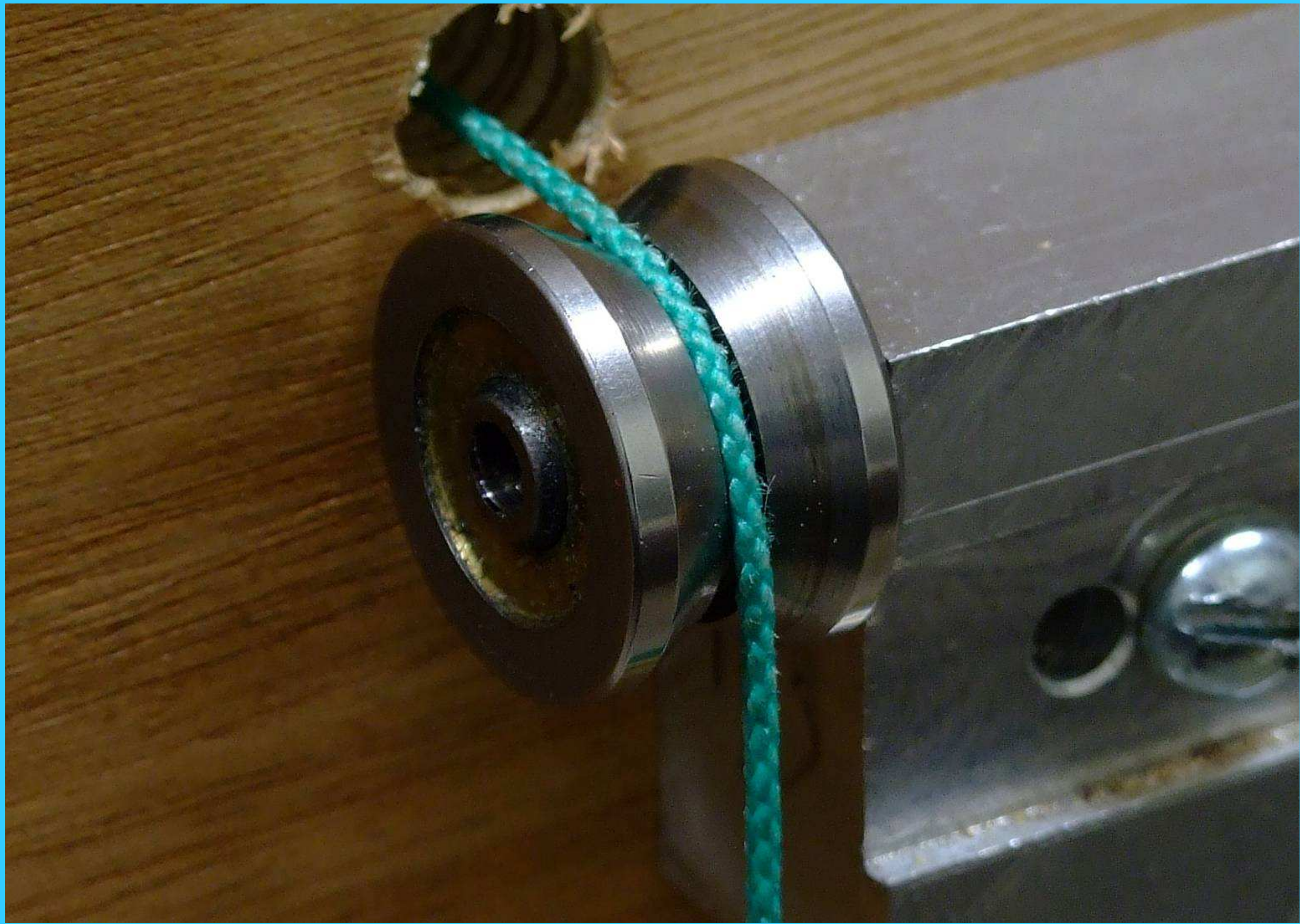
Algunas imágenes para relajarse.

Pesaje de la version lijera de robot

Pesaje de la version pesada de robot

Cargamos el cubo hasta el deslizamiento

Pesaje de la carga



Un detalle del montaje de la polea, para ilustrar el
método del cubo en suspensión.

Aviso sobre como no bloquear las ruedas del robot

Para evitar diseñar y fabricar un sistema mecánico para bloquear de las ruedas, algunos podrían verse tentados a bloquear las ruedas manteniendo la consigna de posición del robot.

Debemos advertir que el que realice esta forma de bloquear las ruedas está atentando seriamente a la vida útil del motor. De hecho cada motor será llevado a su peor punto de trabajo, aquel en el cual ha de detener las ruedas en el humbral de deslizamiento. La potencia disipada por calentamiento joule en este punto de trabajo es máxima, lo que producirá que el rotor empieze a calentarse hasta quemarse en cuestion de pocos segundos.

No se trata de un mal dimensionado del motor, sino que en terminos de par, el robot es muy pesado y la aderencia de los neumáticos es alta.

Vamos a hablar sobre el problema de disipación térmica del motor en los capítulos 4 y 5.

Ejemplo en video del cálculo de Ka por Microb Technology en 2010

Microb Technology 2009 - 2010 Test de Pneus.mp4

Capítulo 2

Estudio del fenómeno de deslizamiento en la fase de aceleración

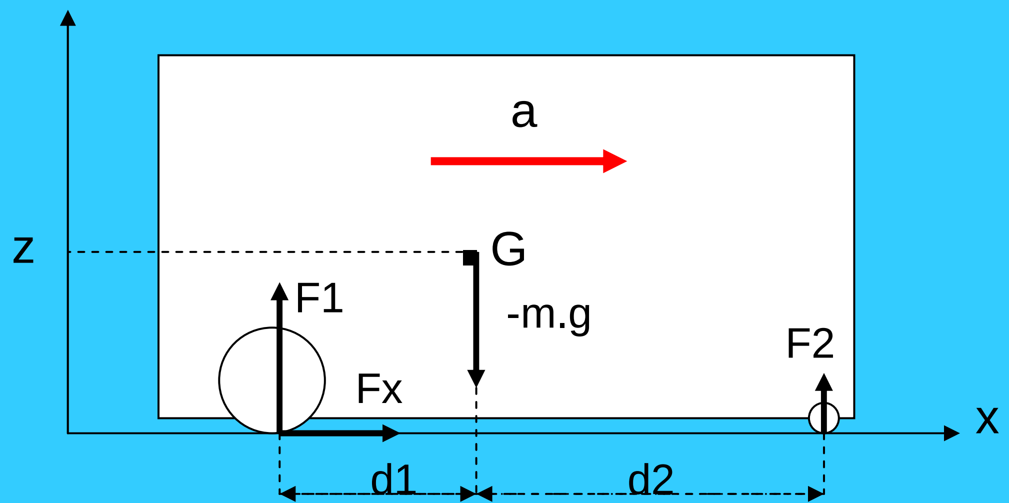
Se demuestra que con la posición del centro de gravedad y el coeficiente de aderencia al suelo de las ruedas motrices se puede calcular una aceleración máxima (que si es superada se producirá deslizamiento o caballito)

Se tratarán dos tipos de robots:

->Robot con ruedas detrás
->Robot con ruedas en el medio (simétrico)

Distribución de los puntos de apoyo

(Robot con dos ruedas traseras y dos roll-ones adelante)



F1 y F2 representan las fuerzas del suelo en la rueda y el roll-on respectivamente.

-m.g representa la fuerza del peso aplicado en el centro de gravedad.

Definimos d = d1+d2

Las relaciones fundamentales de la mecánica para garantizar que el sistema está en equilibrio:

2.F1 + 2.F2 - m.g = 0 (suma de fuerzas verticales = 0)
2.Fx = m. a (suma de fuerzas horizontales = m.a)
F2.d2 - F1.d1 + FX.z = 0 (suma de torsiones aplicadas al punto G = 0)

Obtenemos:

(2.F1)/m.g = d2/d + (a/g).(z/d) — (2.F1)/m.g representa la distribución de pesos en el eje del motor.

(2.F2)/m.g = d1/d - (a/g).(z/d) — (2.F2)/m.g representa el reparto de pesos en la parte delantera.

Los terminos d2/d y d1/d representan las distribuciones de pesos en estático (cuando a=0).

Puede apreciarse que el termino independiente (a/g).(z/d) representa la transferencia de masa del robot.

<u>En fase de aceleración, (a>0) la transferencia de masa se va hacia atrás por lo que el robot avanza y tiende a hacer caballito mientras que en fase de frenado (a<0) la transferencia de masa se va hacia adelante por lo que las ruedas tienden a deslizar facilmente.</u>

Elección de la aceleración máxima (Robot con ruedas atrás)

Resumen de fórmulas:

$(2.F1)/m.g = d2/d + (a/g).(z/d)$

$(2.F2)/m.g = d1/d - (a/g).(z/d)$

$2.Fx=m.a$

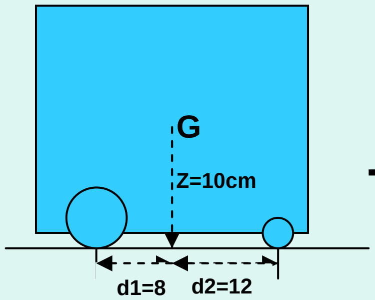
En fase de aceleración, se debe evitar:
El deslizamiento de las ruedas motrices :
El despegue de la parte delantera (caballito) :
Se tomará como a_max el valor más pequeño.

$Fx< ka.F1$	despejando...	$a\_max1 = g. ka. d2/(d-ka.z)$
$F2>0$	despejando...	$a\_max2 = g.d1/z$

En fase de frenado, se debe evitar:
El deslizamiento de las ruedas motrices :
El despegue de la parte delantera (caballito) :
Se tomará como a_max el valor más pequeño en módulo.

$\lvert Fx\rvert< ka.F1$	despejando...	$a\_max1 = g.ka.d2/(d+ka.z)$
$F1>0$	despejando...	$a\_max2 = g.d2/z$

Ejemplos con ka=1

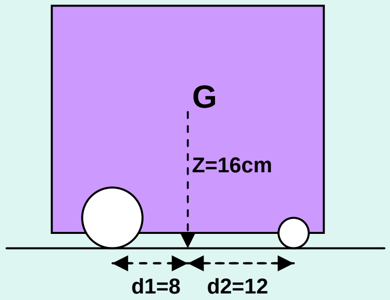


Sentido del movimiento

En aceleración:
a_max1=1.2g
a_max2=0.8g
La limitación la marca el caballito:
a_max = 0.8g
aproximadamente $8m/s^2$

En frenado:
a_max1=0.4g
a_max2=1.2g
La limitación la marca el deslizamiento:
a_max = 0.4g
Aproximadamente $4m/s^2$

En el sentido inverso de movimiento, los resultados son iversos.



El centro de masas ha aumentado 6 cm

En accélération:
a_max1=3g
a_max2=0.5g
La limitación la marca el caballito:
a_max = 0.5g
aproximadamente $5m/s^2$

En frenado:
a_max1=0.3g
a_max2=0.75g
La limitación la marca el deslizamiento:
a_max = 0.3g
aproximadamente $3m/s^2$

En el sentido inverso de movimiento, los resultados son iversos.

<u>Acerca de la elección de la aceleración máxima (Robot con ruedas atrás)</u>

Recordamos que estos cálculos sólo se refieren a los desplazamientos de translación no a giros. Estos cálculos permiten maximizar la aceleración en terminos de rendimiento máximo. Más adelante veremos como escoger una reductora capaz de entregar esta aceleración.
Tenga en cuenta que la simplicidad de estos calculos sólo dependen de la posición del centro de gravedad y el coeficiente de fricción de las ruedas del suelo. En particular el peso del robot no interviene, lo que parecía obvio a priori.

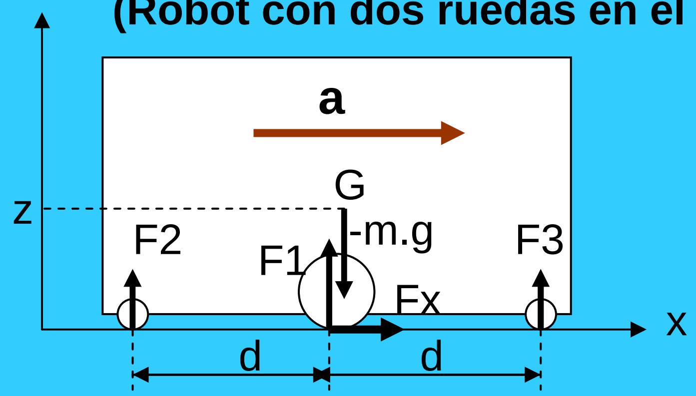
Resumen de las fórmulas:

(2.F1)/m.g = d2/d + (a/g).(z/d)
(2.F2)/m.g = d1/d - (a/g).(z/d)

Nos llevan a las siguientes conclusiones:
Interesa tener el máximo apollo en el eje motriz, aumentando así en la medida de lo posible el termino (2.F1)/m.g, es el termino estático d2/d, <u>lo que lleva el centro de gravedad más cerca del eje de las ruedas.</u>
Cuando la transferencia de masa dinámica (a/g).(z/g) cambia de signo por la aceleración, se consigue una buena fase de aceleración pero una detestable fase de frenado.
Como los robots en los partidos no hacen mas que acelerar y frenar, parece razonable que se reduzca tanto como sea posible la transferencia de masa que depende sólo de la relación (z/d), es decir <u>bajando el centro de gravedad.</u>

Distribución de los puntos de apoyo

(Robot con dos ruedas en el medio y cuatro roll-ones (2 adelante y 2 atrás))



Los vectores F1 y –m.g son colineales.
(Se ha dibujado así para facilitar la legibilidad del dibujo)

Para simplificar, suponemos una simetría del robot (d1=d2=d).
En statique (a=0):

F2 = F3 = 0

2.F1= m.g

El peso del robot apolla plenamente en el eje motriz.
Ahora para la transferencia de masa debida a la aceleración: se demuestra que:

Si el robot acelera (**a** >0)

(2.F1)/m.g = 1 – (a/g).(z/d) → La transferencia de masas se encuentra en el eje motriz

(2.F2)/m.g = (a/g).(z/d → El robot apolla en los rollones traseros.

(2.F3)/m.g = 0

Si el robot frena (**a** >0)

(2.F1)/m.g = 1 – (a/g).(z/d) → La transferencia de masas se encuentra en el eje motriz

(2.F2)/m.g = 0

(2.F3)/m.g = (a/g).(z/d) → El robot apolla en los rollones delanteros.

Conclusión de la elección de la aceleración para un robot con ruedas en el medio

Resumen de resultados:

Si el robot acelera (**a** >0)

(2.F1)/m.g = 1 – (a/g).(z/d) La transferencia de masas se encuentra en el eje motriz.

(2.F2)/m.g = (a/g).(z/d) El robot apolla sobre los rollones traseros.

(2.F3)/m.g = 0

Si el robot frena (**a** >0)

(2.F1)/m.g = 1 – (a/g).(z/d) La transferencia de masas se encuentra en el eje motriz.

(2.F2)/m.g = 0 El robot apolla sobre los rollones delanteros.

(2.F3)/m.g = (a/g).(z/d)

Hay una simetría total ente la aceleración y el frenado.

Al apollar en el eje de motriz disminuye la transferencia de masa en aceleración y frenado.

Cálculo de a_max:

Condición para no deslizar: Fx < ka.F1 (ka: Coeficiente de fricción) lo que lleva a:

a_max1 / g = ka / (1+ka.z/d)

Condición para no hacer caballito: F1 > 0 lo que lleva a:

a_max2 / g = d / z

Es imposible que se produzca caballito con 4 rollones y las ruedas en el medio.

Combinando las dos ecuaciones, obtenemos:

a_max1 = a_max2 / (1+ a_max2 / ka.g) **si** a_max1 < a_max2 **hemos terminado el cálculo**

Ejemplo: d=15cm z=15cm ka=1

a_max1 / g = 0.5

El deslizamiento es el que impone el valor de **a_max,** por tanto **a_max = 0.5g**

(Este límite se aplica tanto para la aceleración como para el frenado).

Resumen de las formulas para el cálculo de la aceleración máxima

<u>Con ruedas atrás:</u>

Para aceleración:

a_max1 = g.ka.d2/(d-ka.z)

a_max2 = g.d1/z

Para frenar:

a_max1 = g.ka.d2/(d+ka.z)

a_max2 = g.d2/z

a_max ha de ser el menor de a_max1 y a_max2.

<u>Con ruedas en el centro:</u>

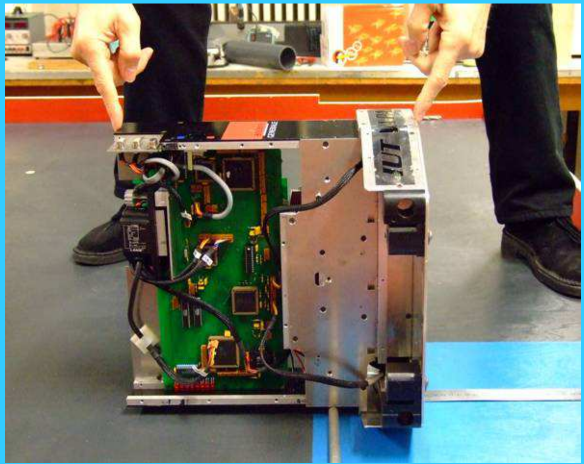
a_max = g.ka/(1+ka.z/d)

Para evitar el deslizamiento debido a errores del cálculo de ka, se recomienda utilizar un factor de seguridad (por ejemplo 0,8.a_max).

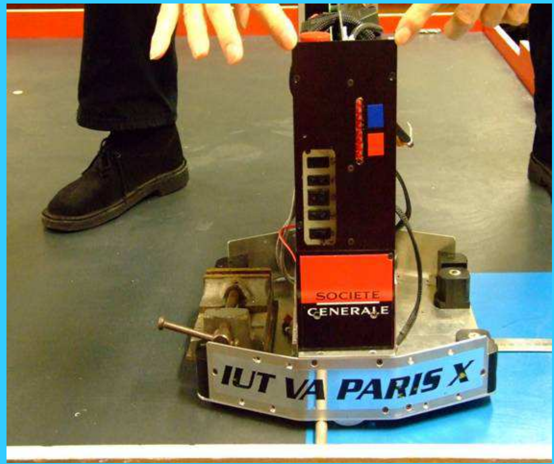
Hemos desarrollado estas fórmulas cuyo contenido es un tanto interesante, hemos aprendido a calcular el coeficiente de fricción de las ruedas y ahora vamos a ver como calcular con precisión el centro de gravedad del robot es decir, los valores d1, d2, d (dado por el diseño) y z.
Basta con usar el <u>método del palo de la escoba</u> presentado en la página siguiente. Otra vez nos encontramos utilizando material de alta tecnología XD.

→Un palo de escoba o una barra cilindrica.
→Una regla graduada.

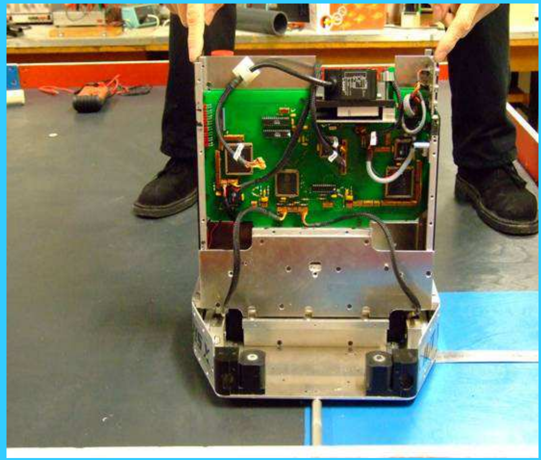
Determinación del centro de gravedad



Medición de z (altura de G), medimos la distancia entre el cilindro y la base del robot, el robot debe de estar en equilibrio sobre el cilindro.



Medimos la posición de G longitudinalmente, medimos la distancia entre el cilindro y una cara frontal del robot.



Verificamos si G es simétrico transversalmente. (Perfecta simetría izquierda-derecha)

Buscamos la posición de equilibrio del robot sobre el cilindro apollado en el suelo. Esta posición es tan inestable que solo debemos de tocar suavemente el robot con dos dedos. Para medir la distancia a la barra se debe apollar una regla en el suelo perpendicularmente al cilindro.
(Si el robot es de forma cilindrica también se puede aplicar este método).

Capítulo 3

Elección de un perfil de velocidad

Vamos a definir un perfil de velocidad para las fases de aceleración y frenado del robot teniendo en cuenta la aceleracion y deceleración máximas determinadas en el capítulo anterior.

Los perfiles seleccionados para las variables de aceleración, velocidad, y distancia son los perfiles deseados que servirán de consigna cuando nos enfrentemos al problema del control de posición.

¿Por qué utilizar un perfil trapezoidal de velocidad?

Vamos a tratar el tema sobre un movimiento de translación, sabiendo que los resultados son transferibles a un movimiento de rotación.

El robot se tiene que mover de un punto origen a otro destino con una trayectoria rectilinea <u>lo más rápido posible.</u> (suponiendo que el robot ya se encuentra en la posición origen y está a punto de salir hacia el punto destino).

El movimiento se va a descomponer en una fase de aceleración, otra de frenado y por lo general una fase intermedia de velocidad constante (a=0).

<u>Elección de las fases de aceleración y frenado :</u>
Si se desean optimizar estas fases, el robot debe de ser capaz en todo momento de ir a su límite de patinaje o caballito (el más restrictivo de los dos). Naturalmente vamos a mantener un margen de seguridad sobre la aceleración máxima. (por ejemplo a = 0,8.a_max).

Las dos fases, por lo tanto requieren una aceleración constante y el movimiento que se produce en el robot es simplemente el movimiento clásico conocido como: **movimiento uniformemente acelerado**, cuyas fórmulas son las siguientes:

Aceleración = constante
Velocidad = a.t
Distancia = ½. $a.t^2$

Elección de la velocidad máxima:

Es una cuestión de sentido común, sabiendo las dimensiones del campo y teniendo en cuenta las tareas que deben realizarse en presencia de un adversario que hay que evitar a toda costa, se pueden pensar en muchas magnitudes de velocidad máxima, pero parece que la velocidad máxima 1 m/s es una opción razonable, dado que incrementar más la velocidad proporcionará una ganancia en tiempo insignificante, dado que el robot suele hacer movimientos de corta distancia

Ejemplo del cálculo de la velocidad máxima

Distancia = 1m
a = 0.2g = 2m/s² (Aceleración de frenado)
t1,t2,t3 es la duración de cada fase del movimiento: aceleración,velocidad constante, frenado.
d1,d2,d3 es la distancia de cada fase del movimiento.

v_max = 1m/s

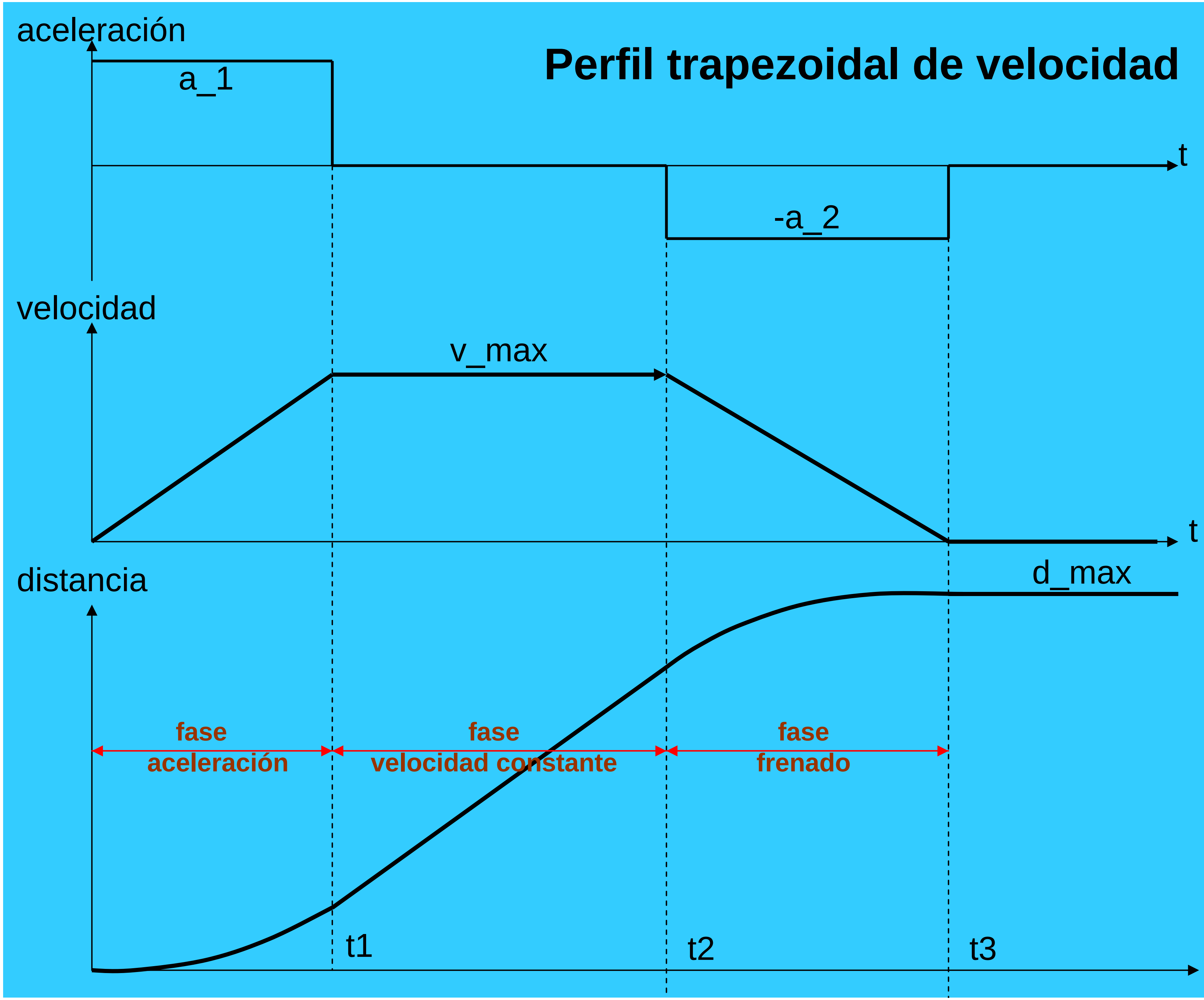
t1=t3=v_max/a=0.5s **(fase de aceleración o frenado)**
d1=d3=1/2.a.t²=0.25m
d2=distancia-2.d1=0.5m
t2=d2/v_max=0.5s **(fase velocidad constante)**
t1+t2+t3=1.5s

v_max = 1.4m/s

t1=t3=v_max/a=0.7s (**fase de aceleración o frenado)**
d1=d3=1/2.a.t²=0.49m
d2=distancia-2.d1=2 cm
t2=d2/vmax=0.014s **(fase velocidad constante)**
t1+t2+t3=1.41s

Al pasar de 1 m/s a 1,4 m/s ganamos 1/10 seg, lo que es despreciable !!

Perfil trapezoidal de velocidad



Comentarios sobre un perfil trapezoidal de velocidad:

Se observa una evolución parabólica en la distancia en las fases de aceleración y frenado que permite un movimiento suave aunque su aceleración máxima aceptable (0,8 a_max). En estas condiciones no vemos interés en disminuir la aceleración máxima (reducir el factor de seguridad a 0,7 o menos) ya que perderíamos rendimiento sin ganar nada de fiabilidad mecánica.

Especialmente se verá más adelante que esta curva de **distancia** representa de echo una curva de **consigna de la distancia**. Y la constante de tiempo mecánica del robot podrá suavizar si es necesario aun más la evolución real del robot.

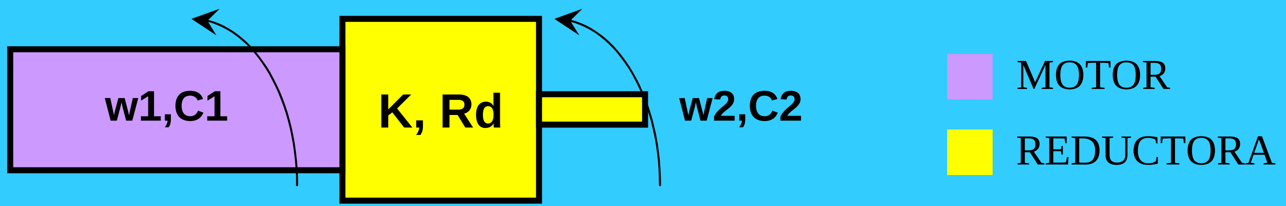
Capítulo 4

Las leyes mecánicas y térmicas en un motor

Recordemos primero las leyes básicas de un motor de corriente continua en régimen permanente. Para luego repasar los problemas térmicos.

Hemos aprendido a elegir la aceleración máxima. Ahora vamos a aprender a calcular los motores que sean capaces de entregar esta aceleración (o par)
Nos vamos a limitar a la elección de los motores DC, dejando de lado los motores brushless, aunque son interesantes para este tipo de robots por su alto rendimiento, nuestra experiencia en motores no va mas allá de los motores DC.

Presentación del problema: (suponemos que la rueda va directamente conectada al eje de salida de la reductora)



Siendo:

K : Relación de reducción de la reductora.
Rd: Rendimiento de la reductora

w1: Velocidad angular del motor
M1: Par del motor
P1=C1.w1: Potencia mecánica del motor

w2: velocida angular de la rueda
M2: Par en la rueda
P2=C2.w2: Potencia mecánica en la rueda

$$\boxed{\begin{array}{l} w2 = w1/K \\ M2 = M1.Rd.K \\ P2 = P1.Rd \end{array}}$$

Nótese que la relación entre las potencias no depende de K. Si aumentamos K, aumentamos con ello el par en la rueda pero disminuimos la velocidad en la rueda.
Por tanto el diléma está en la elección óptima de K.

Conceptor básicos del motor DC:

$U = r.i + k_v.w$

$M = k_m.i$

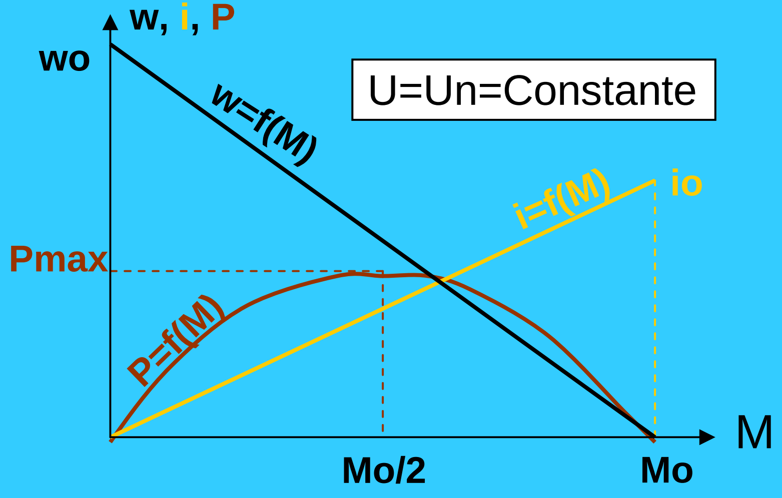
Variables:

- **U**: tension de inducido (v)
- **w**: velocidad de rotación (rad/s)
- **M**: par motor (N.m)
- **i**: corriente de inducido (A)

Constantes:

- **r**: resistencia de inducido (ohm)
- **k_v**: constante de velocidad (v/rad/s)
- **k_m**: constante de par (N.m/A)

Curvas en función del par motor a tensión nominal constant Un:



La velocidad w disminuye linealmente cuando el par aumenta.

La corriente de inducido es proporcional al par.

$w_o=U_n/k_v$ (velocidad de vacío para M=0)

$i_o=U_n/r$ (corriente de arranque para w=0)

$M_o=k_m.i_o$ (par de arranque para w=0)

Nota inesperada e increíble:

$k_v=k_m$ (**dado que en el SI de unidades: Kv en v/rd/s y Km en N.m/A, igualando y despejando: v.A = rad/s . Nm)**

La potencia mecánica máxima P=M.w que puede entregar el motor se produce cuando M=Mo/2

A la potencia máxima Pmax:

El término **r.i** (término Ohmico o término de par) es igual al término **k_v.w** (término de velocidad) lo que significa que la mitad de la tensión **U** se está utilizando para mantener el par, la otra mitad se utiliza para mantener la velocidad. La potencia eléctrica **U.i** suministrada al motor es igual a **2.Pmax** por tanto, el rendimiento es sólo del 50%.

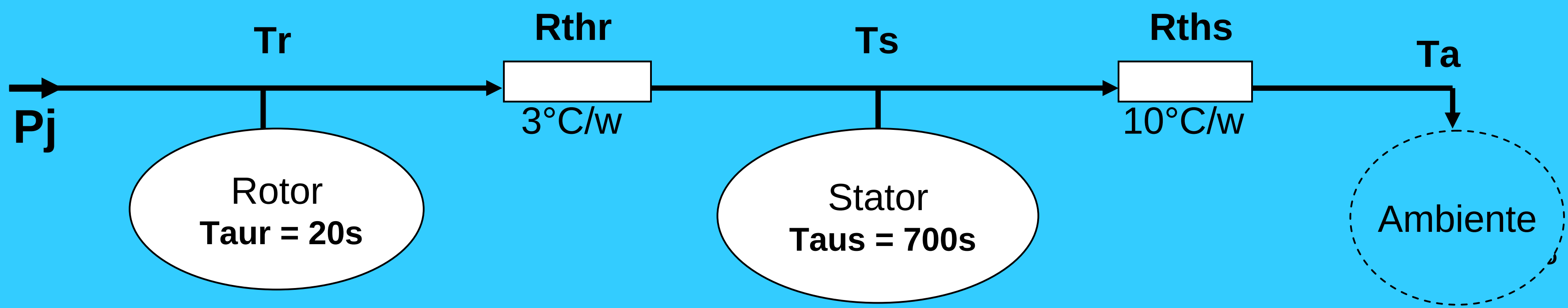
Los problemas térmicos de un motor

La potencia **Pj** disipada dentro del motor eleva su temperatura. Esta temperatura del rotor no puede ser disipada si se encuentra dentro del rago límite 100-125ºC.
Para los tipos de motores utilizados en Eurobot, las magnitudes de los parámetros que definen la transferencia de calor son:

Resistencia térmica rotor-stator	**Rthr** = 3°C/W
Resistencia térmica estator-ambiente	**Rths** = 10°C/W
Constante de tiempo térmica del rotor	**Taur** = 20s
Constante de tiempo térmica del estator	**Taus** = 700s

Las leyes de ohm térmicas para el <u>regimen permanente</u> son:

Tr-Ts = Pj.Rthr	**Tr**: temperatura del rotor
Ts–Ta = Pj.Rths	**Ts**: temperatura del estator
Tr- Ta = (Rths+Rthc).Pj	**Ta**: temperatura ambiente



Cálculo de la vida útil de un motor cuando se bloquea el rotor

El cálculo que se muestra puede ser considerado teórico. Bueno en realidad no lo es tanto:
Suponiendo un robot controlado en posición (sin un sistema software anti-bloqueo), al ser empujado, el controlador provocará bruscamente un bloqueo de un rueda (de cualquier manera que ahora no nos interesa evaluar).

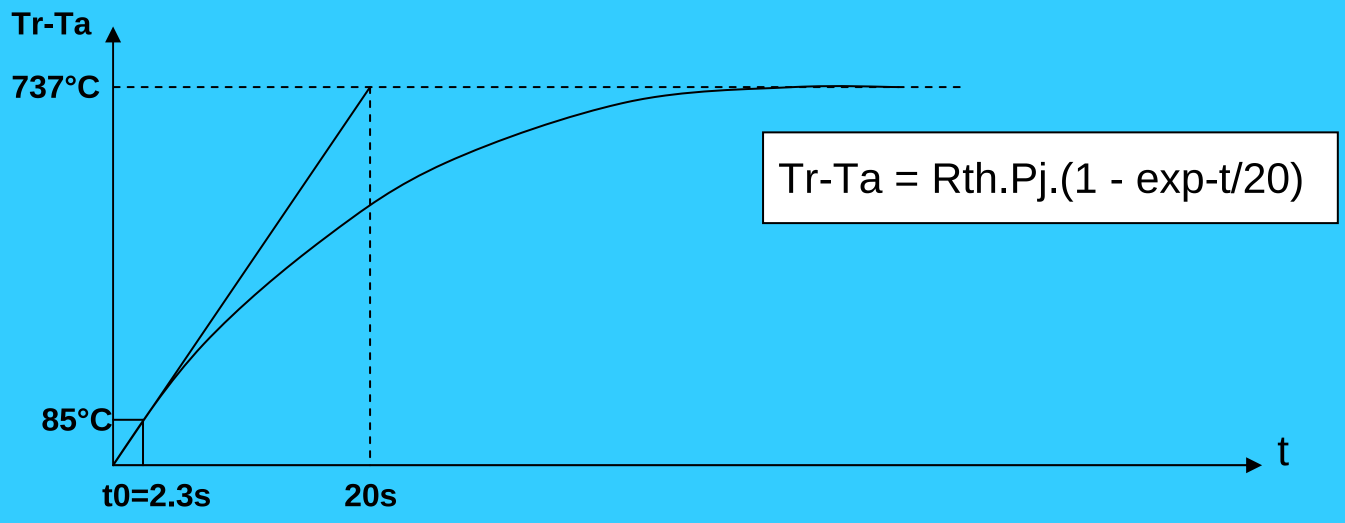
Vamos a evaluar la vida útil del motor de la rueda bloqueada:
El controlador va a reaccionar ante el bloqueo aumentando la tensión al motor hasta la saturación, es decir, la tensión de alimentación, por tanto, la corriente del rotor (inducido) aumentará hasta su valor máximo (**imax**).

Imax = Vcc/r (Sin tener en cuenta la caida de tensión en el puente en H).
Pj = r.imax² Potencia disipada en el rotor del motor.

La temperatura del estator no tiene suficiente tiempo de cambio, debido el elevado valor de su constante de tiempo (700s por ejemplo).

Sin embargo, la temperatura del rotor va aumentando muy deprisa debido a su pequeña constante de tiempo (20s por ejemplo).

Tomemos como ejemplo de motor un maxon RE025 de Un = 24v:
r = 2.34ohm Rthr=3°C/w constante de tiempo termica del rotor = 20s
Vcc=24v Trmax=110°C Ta=25°C
Suponemos que el estator no tiene tiempo suficiente para cambiar su temperatura por ello Ts=Ta
Imax = Vcc/r = 24/2.34 = 10.25A
Pj = r.imax² = 246 w potencia disipada por el rotor debido al paso de alta corriente.
Tr - Ts = Tr - Ta = Rthr.Pj = 737 °C
Claro está que este es un valor asintótico, es decir, que nunca será alcanzado por el rotor. El motor empezará a echar humo en cuanto el rotor supere los 110ºC, y el estator Tr-Ta=110-25=85ºC.



Mediante la aproximación de la exponencial con un tangente obtenemos una vida útil (t0):
t0= 20. 85/737 = 2.3 s
La vida útil del motor en caso de que una rueda se quede bloqueada es de 2,3 s.
(A menos que el Puente en H sirva como fusible y se rompa antes que el motor ☺)
Dan miedo estos cálculos !!

Capítulo 5

Estudio del deslizamiento producido por el bloqueo de las ruedas

Estudiaremos el caso de que haya un obstaculo bloqueando el robot.
Calcularemos la reductora que permita conseguir una aceleración límite.

Estudio del fenómeno de bloqueo de un robot

Estudiaremos el fenómeno de bloqueo del robot (no del bloqueo de las ruedas).

Si se bloquea sobre un obstáculo (por ejemplo el borde del campo o el oponente), aparece el problema de sobrecalentamiento. El controlador va a reaccionar aumentando la tensión U hasta la saturación.
Entonces **U = Vsat = Vcc = r.i₀** (La velocidad es nula dado que la rueda está bloqueada), pueden producirse dos situaciones:

->La reductora se dimensiona correctamente y el deslizamiento se producirá antes de que la tension de la alcance su tension de saturación Vsat.
Este caso es el favorable, dado que si el robot desliza, la fuerza de tracción disminuye drásticamente. Los que hayais empujado un amario sabreis que la fuerza para impulsar el moviento (aceleracion > 0) es mayor que la fuerza de necesaria para mantener el movimiento (aceleración = 0).
El robot empieza a patinar contra el borde del campo, lo que hace que el motor no se queme, porque en la ecuación **Vsat** = **r.i** +**λv.w** el termino de velocidad va a disminuir el termino **r.i** y tambien el termino de potencia **r.i²**.

->La reductora está dimensionada de tal forma que el par es inferior al de deslizamiento, por lo que cuando la tensión del motor alcanza la de saturación, las ruedas no deslizan, por lo que la corriente empieza a aumentar rápidamente y el humo negro empezará a salir de la carcasa del motor. Este es el caso estudiado anteriormente.

Vamos a ver como se calcula la reductora para que las ruedas deslicen antes de que la tensión del motor llegue a la tensión de saturación.

Calculamos el par motor M1 necesario para producir el deslizamiento:

2.Fxmax=ka.Fz

La fuerza de tracción máxima 2.Fxmax en el límite de deslizamiento es proporcional al apoyo Fz del robot en el eje de las ruedas y el coeficiente de fricción de la rueda con el suelo. (este valor Ka.Fz, es exactamente igual al peso del cubo en el método de medición presentado en el capítulo 1, "método del cubo en suspensión").

Mr=Fxmax.(D/2) Par en la rueda
M1 = Mr/(K.Rd)

Calculo del par máximo M2 que puede dar el motor:

U=Vsat
i = Vcc/r
M2 = Km.i = Km.Vcc/r

De hecho, por razones de seguridad y la experiencia personal sobre esta cuestión, se constató un margen del 20% mayor que se necesitaba en comparación con el límite teórico (hay que tener en cuenta que ka puede variar de un campo de juego a otro y también que el deslizamiento debe ser apreciable)

M2>=1,2.M1

Esta condición asegura un deslizamiento correcto en caso de bloqueo de las ruedas. Para un motor dado, vamos a deducir la relación mínima de reducción para que se cumpla esta condición.

De las ecuaciones anteriores, se obtiente:

Kmin = 1,2.(ka.Fz).D.r / 4.Km..Vcc.Rd

ka coeficiente de friccion o aderencia de las ruedas al suelo
Fz: apollo del robot en el eje motriz (N)
D: diametro de las ruedas motrices (m)
r: resistencia de inducido del motor (ohm)
Km: constante de par del motor (N.m/A)
Vcc: tensión de la batería (v)
Rd: rendimiento mecánico de la reductora

Y queremos que **K** > **Kmin** para que deslicen las ruedas en caso de bloqueo

<u>Nota sobre la determinación del término Ka.Fz:</u>

→ **Ka.Fz** es igual al peso del cubo en suspensión en el método de medición de Ka
→ Una vez conocida Ka (o estimada) y se haya medido Fz:
Si el eje de las ruedas está en el centro y el robot es simétrico -> **Fz=M.g**
En caso contrario -> **Fz=M.g.d2/d** (ver Capítulo 2)

Notad que Kmin aumenta si:
-> ka.Fz, D, r aumenta
-> Km, Vcc disminuye

Esto parece bastante lógico.

Elección de una relación de reducción para un motor dado

Tomemos el ejemplo de dos motores, teniendo en cuenta para las potencias diferentes.

Datos del robot:

M=15kg masa del robot con eje motriz en el centro del robot (Fz=M.g)
D= 6cm diámetro de las ruedas
ka=1 coeficiente de aderencia

Batería de 24v

Motor de potencia 10w 24v
r=7.55 ohm
Km=43.8 mN.m/A

Motor de potencia 20w 24v
r=2.34 ohm
Km=23.5 mN.m/A

Determinamos la reductora: (utilizando la fórmula de la página anterior)

Para el motor de 10w
Kmin=28
Buscando en el catálogo **K=36**

Para el motor de 20 w
Kmin=16
Buscando en el catálogo **K=20.25**

Capítulo 6

Elección de la velocidad y de la aceleración

Vamos a suponer un funcionamiento de los motores sin saturación y determinaremos el comportamientos del robot en términos de velocidad y aceleración.

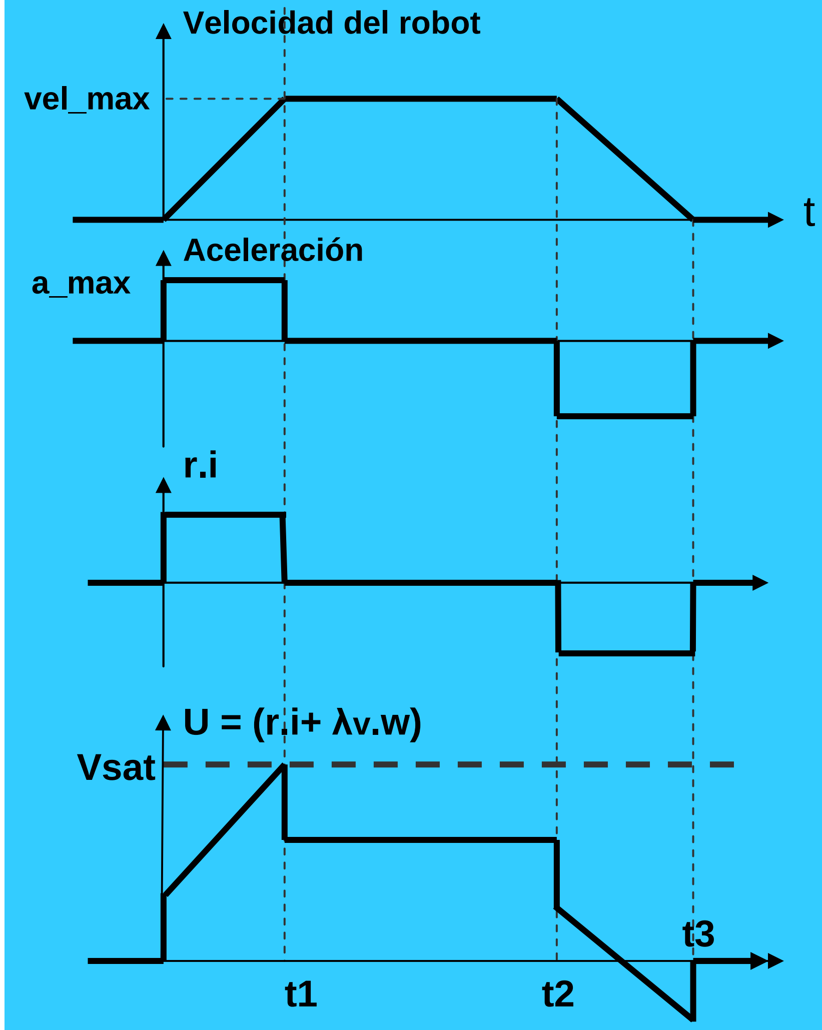
Evaluación del comportamiento con tensión de saturación

Vamos a imponer un funcionamiento del controlador sin saturación. La tensión U de alimentación de los motores debe por tanto ser inferior en todo momento a la tensión de saturación Vsat.

En un funcionamiento sin bloqueos, nos interesa saber cual es la tensión U máxima que debemos aplicar, o lo que es lo mismo cual es el margen que debemos dejar en Umax hasta la saturación.

El razonamiento que vamos a seguir se basa en el perfil trapezoidal de velocidad, recordando que se trata de un perfil deseado, es decir, corresponde a un perfil de consigna de velocidad.
Para simplificar el problema, se asume que este perfil coincide con el perfil de velocidad real. Esto equivale a descuidar las diferencias en el bucle de servo.

Funcionamiento normal de un robot sin bloqueos



Encontramos el perfil de velocidad de forma trapezoidal.

La aceleración del robot es constante = **a_max** durante las fases de aceleración y frenado.

Si la aceleración es constante, el par moror y la corriente son constantes

Como se ha visto anteriormente, U es la suma del termino ohmico y el termino de velocidad.
Desde 0 hasta t1, el termino óhmico es constante y el termino de velocidad es proporcional a la velocidad del robot

Si quieres elegir la mejor relación de reducción, se debe escoger **v_max** y **a_max** de modo que el valor máximo de U se debe de corresponderse con la tensión de saturación **Vsat**. Lo que significa que se va a situar el limite de saturación en el instante t1, el más crítico.

Los límites de funcionamientos sin saturación vienen dados por la ecuación:

Vcc=r.i + Kv.wm (1) ecuación válida en el instante de tiempo t1 (final de la fase de aceleración)

i= Mm/Km	corriente de inducido	(A)
Mm=Mr/(K.Rd)	par en el eje de salida	(N.m)
Mr=Fx.D/2	par en la rueda	(N.m)
2Fx=M. a	fuerza de tracción	(N)
wm =K.wr	wm:velocidad angular del motor	(rd/s)
	wr: velocidad angular de la rueda	(rd/s)
v=2.wr/D	velocidad lineal del robot	(m/s)

La ecuación (1) se simplifica si expresamos la corriente I en función de la acc, y wm en función de Vmax:

Vcc= [(r+ra).D.M/(4.K.Rd. Km)**]. acc + [**2.Kv. K/D**].vel_max**

Ecuación de la forma:

Vcc=A. acc + B. Vel_max

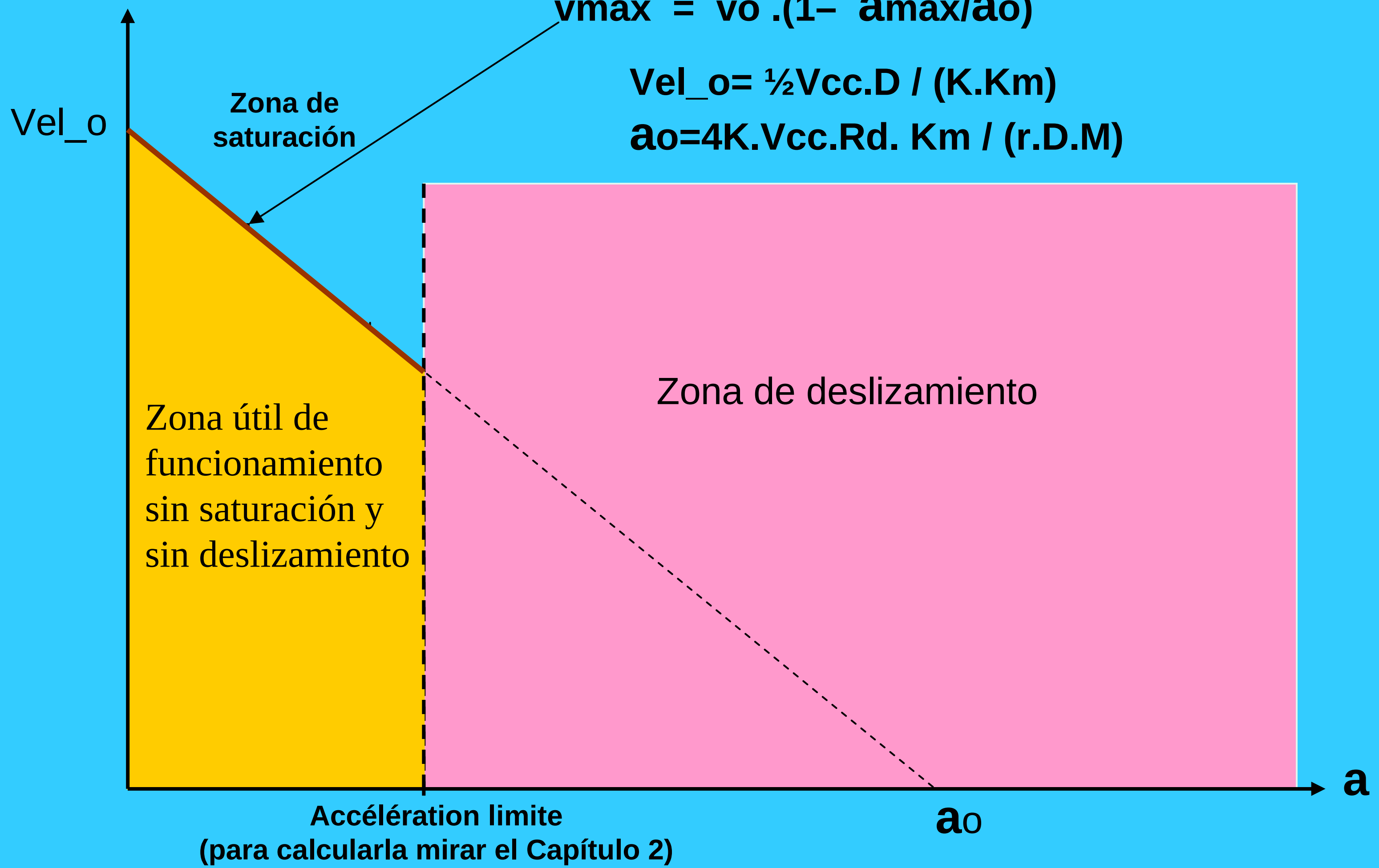
Ecuación de una recta si representamos **Vmax** en función de **acc** (aceleración).

El valor del par (amax, vmax) debe ser elegido en la zona amarilla o al límite de la linea roja, mediante la ecuación:

$$vmax = vo\,.(1- amax/ao)$$

$$Vel\_o = ½Vcc.D \,/\, (K.Km)$$

$$ao = 4K.Vcc.Rd.\,Km \,/\, (r.D.M)$$



K: Relacion de reducción de la reductora **Rd: rendimiento de la reductora**	**Datos de la reductora**
D: diametros de las ruedas (m) **M: masa del robot (kg)**	**Datos del robot**
Km: constante de par (N.m/A) **r : resistencia de inducido (ohm)**	**Datos del motor**

Veamos el ejemplo anterior con dos motores distintos de Maxon:

<u>Datos del robot:</u>

M=15kg masa del robot

D= 6cm diámetro de las ruedas

ka=1 coeficiente de aderencia

<u>Batería</u> de 27v

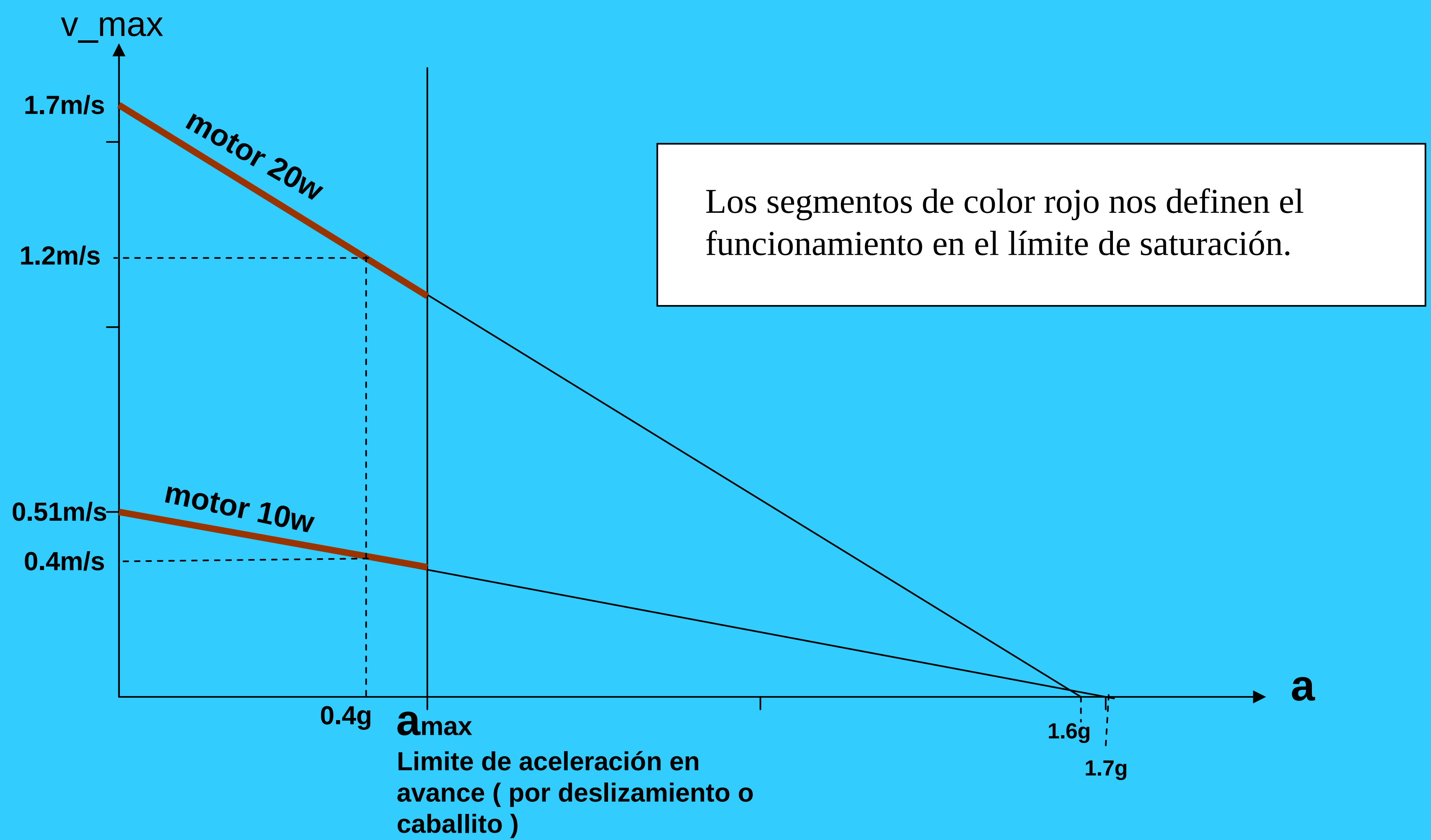
<u>Motor de potencia 10w 24v</u>	**<u>Motor de potencia 20w 24v</u>**
r=7.55 ohm	r=2.34 ohm
Km=43.8 mN.m/A	Km=23.5 mN.m/A
Velocidad máxima 5500 rpm	Velocidad máxima 11000rpm
Reductora K=36	**Reductora K=20.25**

Utilizando las fórmulas de la página anterior obtenemos:

<u>Moteur puissance 10w</u>	**<u>Moteur puissance 10w</u>**
vo=0.51m/s	**vo=1.7m/s**
ao=1.7g	**ao=1.6g**

Si vemos las dos rectas representadas:

Velocidad y aceleración máxima para nuestros dos motores:



Ejemplo:

Si fijamos una aceleración de **0,4g:**

Para un motor de 20w, la velocidad máxima no superará **1,2m/s**

Para un motor de 10w, la velocidad máxima no superará **0,4m/s**

Capítulo 7

Pruebas con registro de datos

En este capítulo verificaremos los cálculos anteriores, y sobre todo si es cierto que la tensión alcanza un máximo al final de la aceleración, lo que es más critico en cuanto a saturación

Pruebas con registro de datos

Las pruebas han sido realizadas bajo las siguientes condiciones:

Robot 2007 ligeramente modificado:

M = 12.7 kg
Motores Maxon RE025 con una reductora Dunkermotoren de relación **20.25**

Valores de consigna:

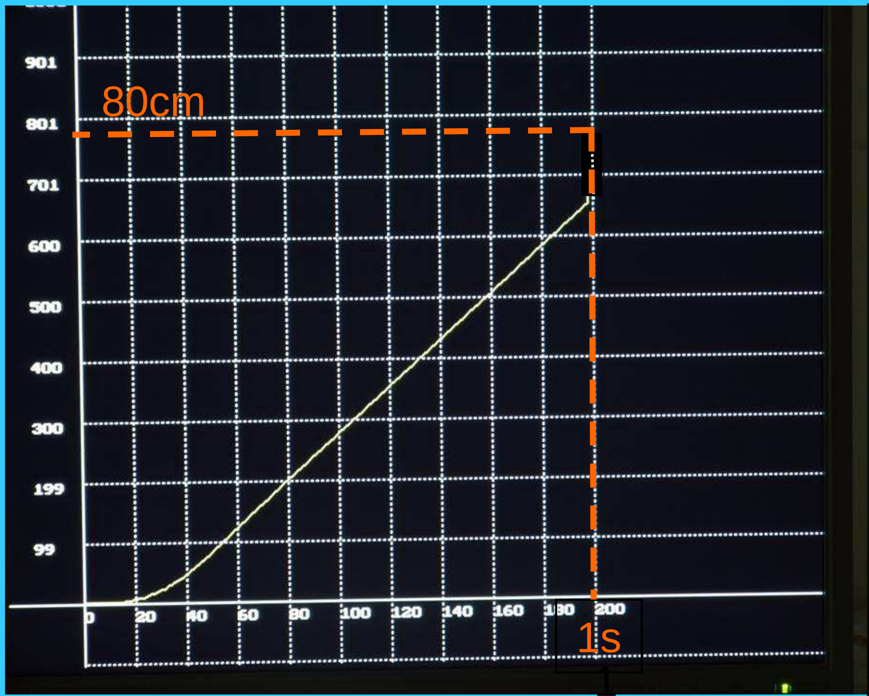
Distancia= 80cm
Aceleración= 0.5g
Control de posición con corrector derivativo no optimizado del todo.
Pruebas a dos velocidades: **0.8m/s et 1.4m/s**

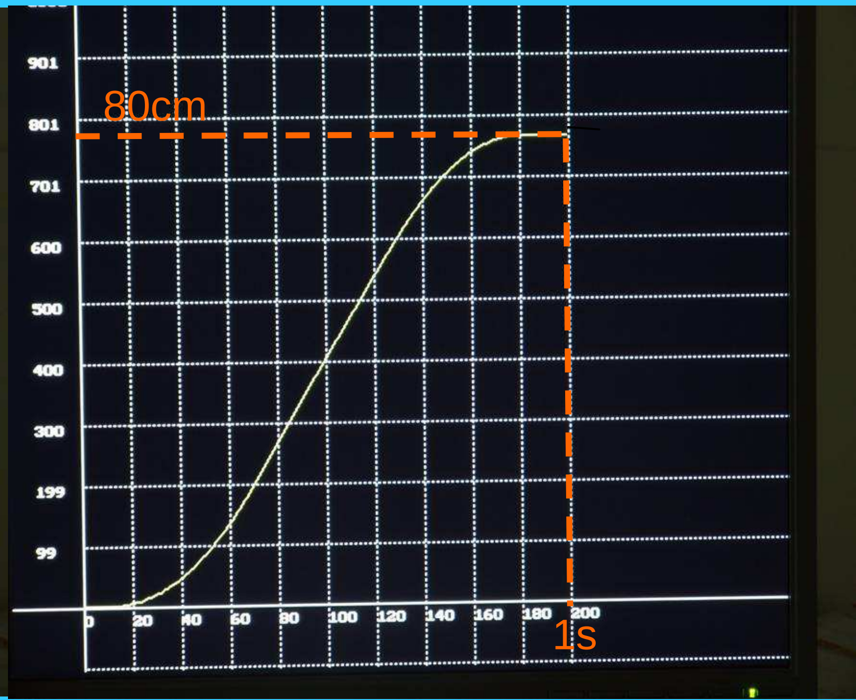
Mediante la aplicación de la fórmula de la velocidad máxima en función de la aceleración, Se ha calculado **vmax=1,5m/s** para una aceleración escogida de **0,5g** (funcionamiento en límite de saturación).

Probamos a 0,5g y 1,4m/s (va como una bala) ☺

Distancia recorrida en función del tiempo

Todas estas gráficas no son simulaciones, sino que corresponden a un registro de datos mediante un programa de depuración escrito en C gráfico.





Velocidad=0.8m/s s

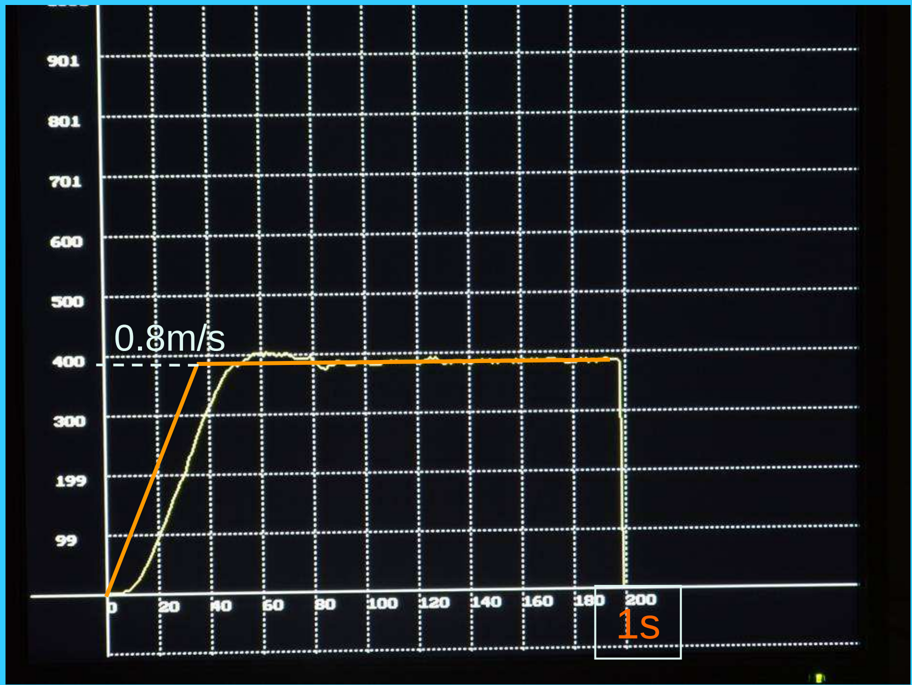
La distancia fue cubierta en 1.2s
El registro de datos termina en 1s.

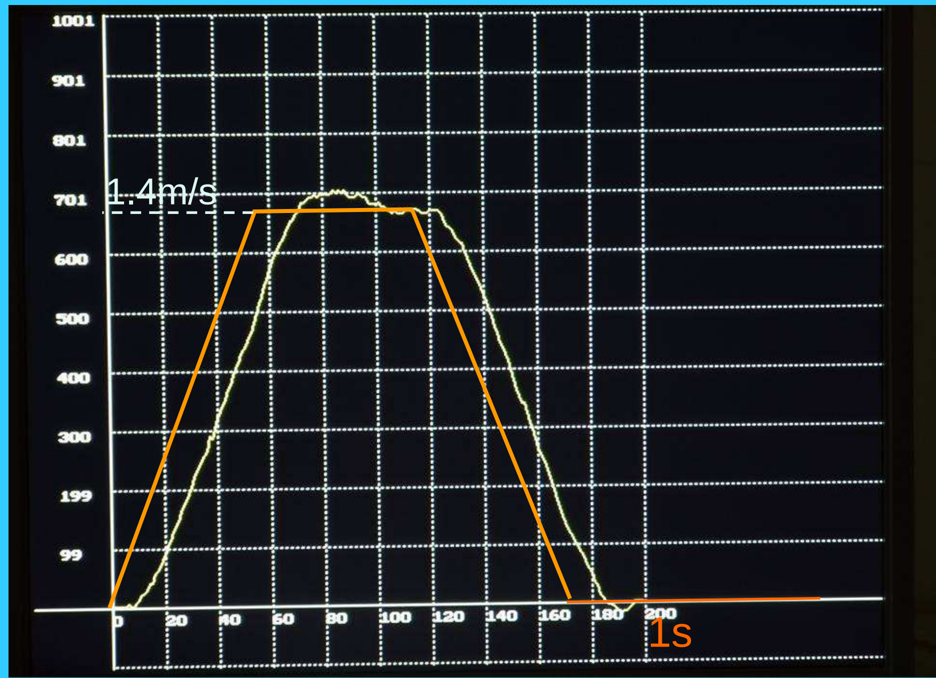
Velocidad=1.4m/s

Aceleración y frenado suaves.
No se pasa excesivamente de distancia en el frenado, (de hecho se pasa unos milimetros, pero no son apreciables en esta escala)

Recorrido de 80 cm en tan sólo 1s!

Evolucion de la velocidad





<u>Velocidad de 0.8m/s</u>

<u>Velocidad de 1.4m/s</u>

En rojo, podemos ver el perfil trapezoidal de consigna de velocidad (en el pie de foto está el valor)

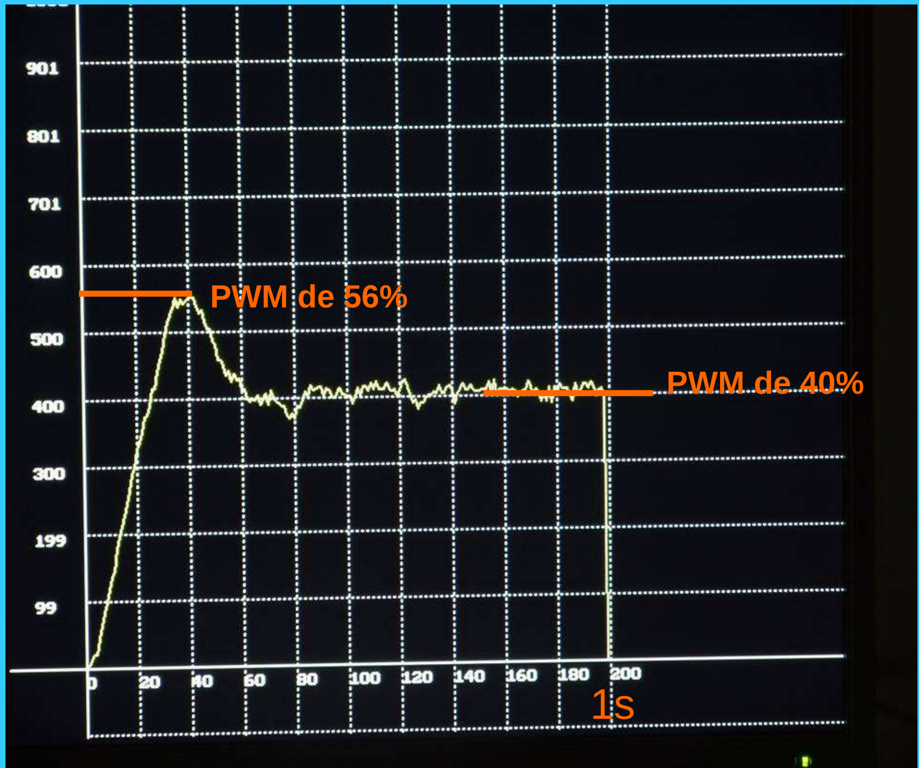
Obsevese:

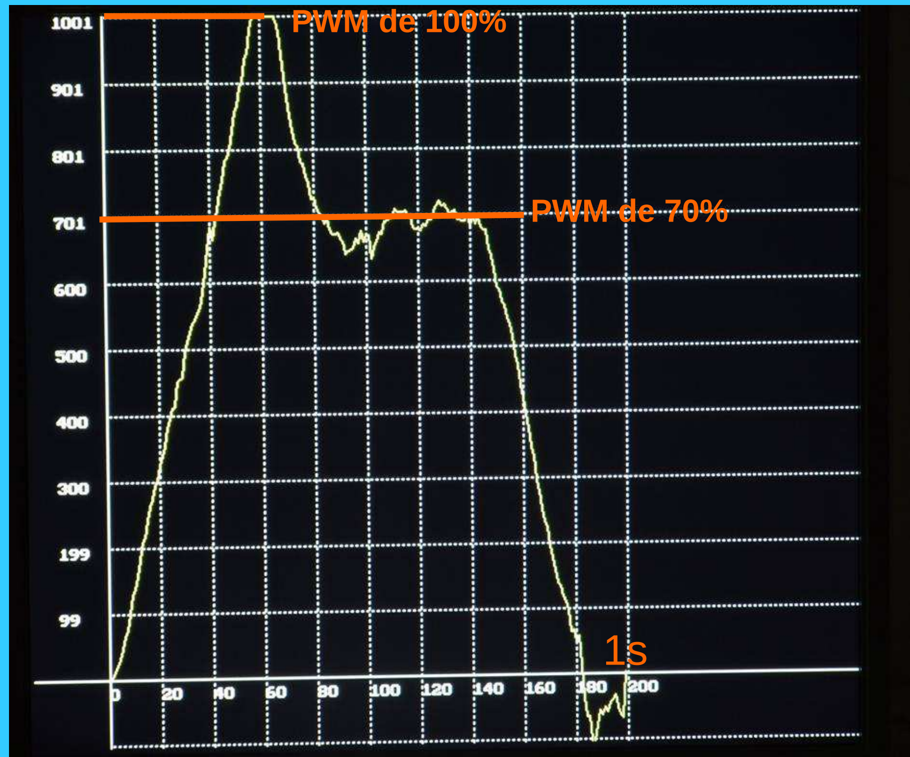
Un error de retardo durante las fases de aceleración y frenado.

Una desviación nula durante la fase de velocidad constante.

Un sobreimpulso de la velocidad en el fin de la aceleración y un pequeño sobreimpulso hacia abajo en el fin del frenado.

Evolución de la señal aplicada a los motores





Velocidad de 0.8 m/s

Velocidad de 1.4m/s

Las pruebas confirman que la tensión del motor pasa bien por su máximo al final de la fase de aceleración.

A 1,4m/s se satura, pero en realidad (viendo la curva de velocidad) estamos yendo a 1,5 m/s (en fin...)

El ruido que se produce en la señal del motor cuando la velocidad es constante es inevitable (es debido en parte al ruido de cuantificación del término derivativo) y no tiene efecto sobre la distancia (debido al efecto de filtración del motor por la constante mecánica)

Capítulo 8

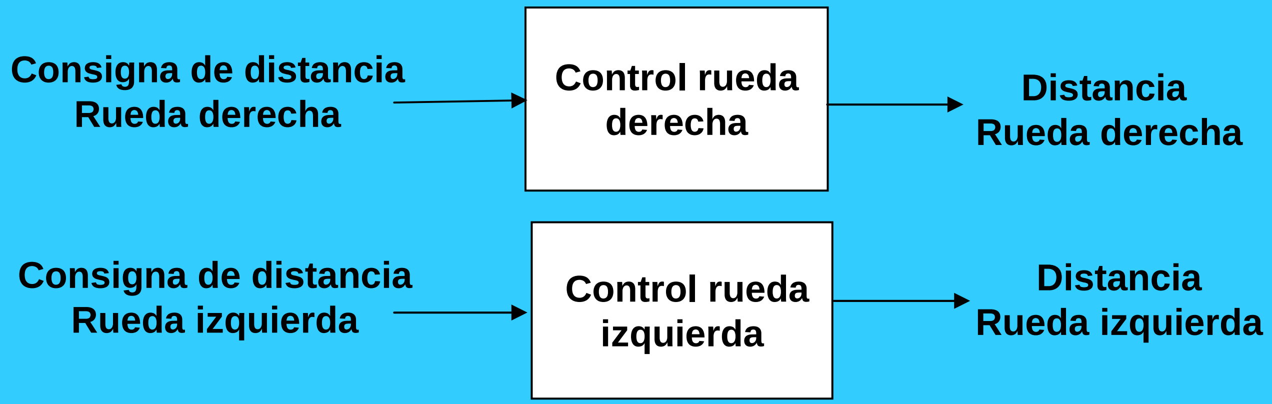
Control

La mayor parte sobre el tema fue ampliamente debatido a través del foro y artículos disponibles en los sitios Web de los equipos participantes.

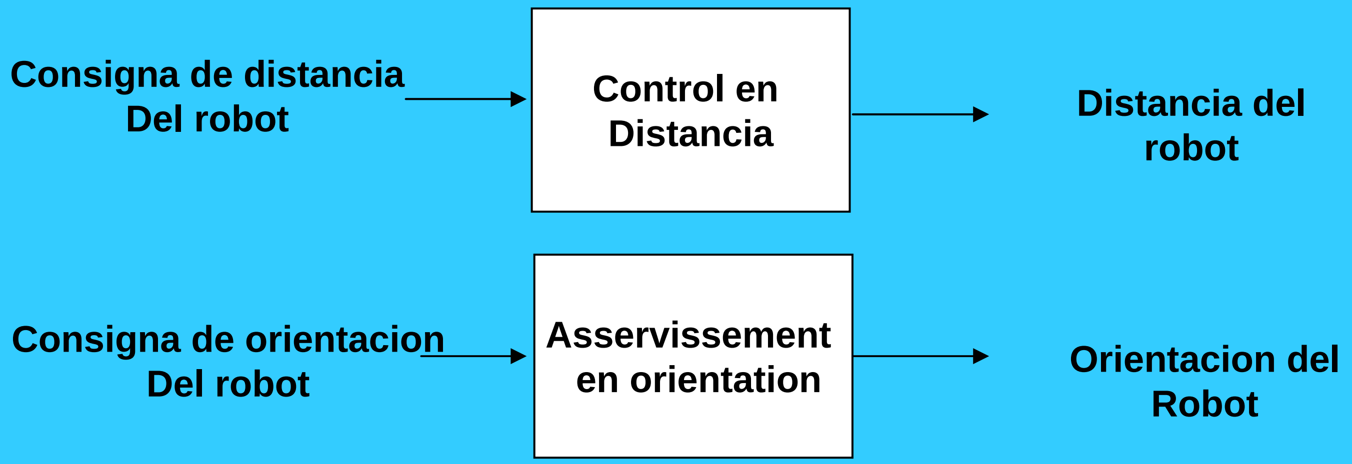
Basta con recuperar parte de nuestros documentos ya publicados sobre el tema, hacer hincapié en ciertos puntos y comentar algunos resultados experimentales.

Los dos principios de control de posición de un robot

<u>Principio 1</u> **(**Control por rueda)



<u>Principio 2</u> **(**Control polar)



No vamos a ver las ventajas del controlador polar, pero ha de tenerse en cuenta que su elección es indispensable para alcanzar un buen rendimiento.

Un robot con un controlador tipo 1 bien ajustado, siempre será superior en rendimiento y fiabilidad que un robot que utilice un controlador de tipo 2 y esté mal ajustado.

Hay que tener en cuenta que los componentes como el LM629 implementan internamente un control de tipo 1, lo que quita trabajo al diseñador y le permite centrarse más en el resto.

En la época de los PRI (pequeños robots inteligentes) autorizados por el reglamento, se utilizó esta técnica con éxito, creo recordar algunos de estos robots moverse por el campo de juego a 2m/s (lo que no era apreciado por todos ☺)

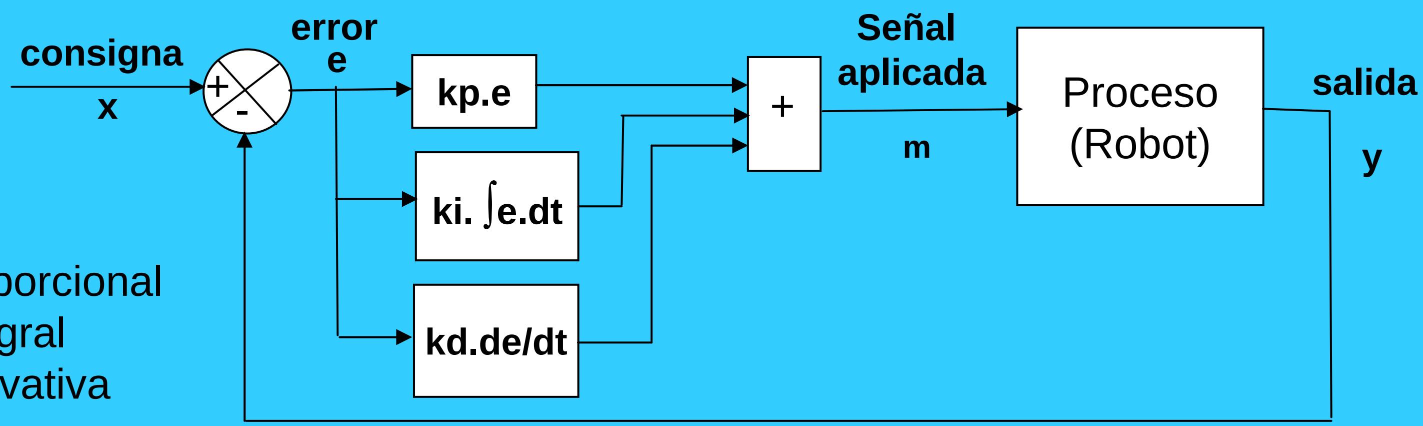
Independientemente que el controlador sea desarrollado por un componente o desarbolado de forma software, vamos a tener el problema de la elección de los parámetros del controlador (común en los dos tipos de sistemas).
Hemos de obtener la ganancia y las constantes integral y derivativa del controlador PID, es evidente que el LM629 no va a inventar estas variables por lo que habrá que pasárselas para que realice correctamente el control.

En las siguientes transparencias, los principios expuestos son de carácter general y validos en los tipos de controladores, pero los ejemplos son expuestos para controladores de tipo polar.

Control analógico aplicando un PID

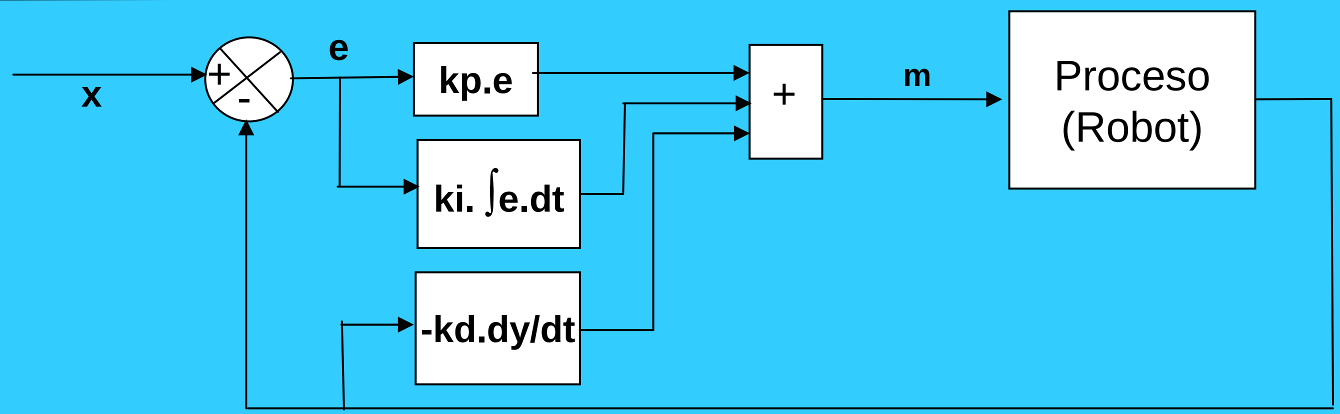
Vamos a introducir vocabulario para las dos estructuras posibles de un controlador PID:

PID clásico



kp: ganancia proporcional
ki: ganancia integral
kd: ganancia derivativa

Control PID con un controlador derivativo de la salida

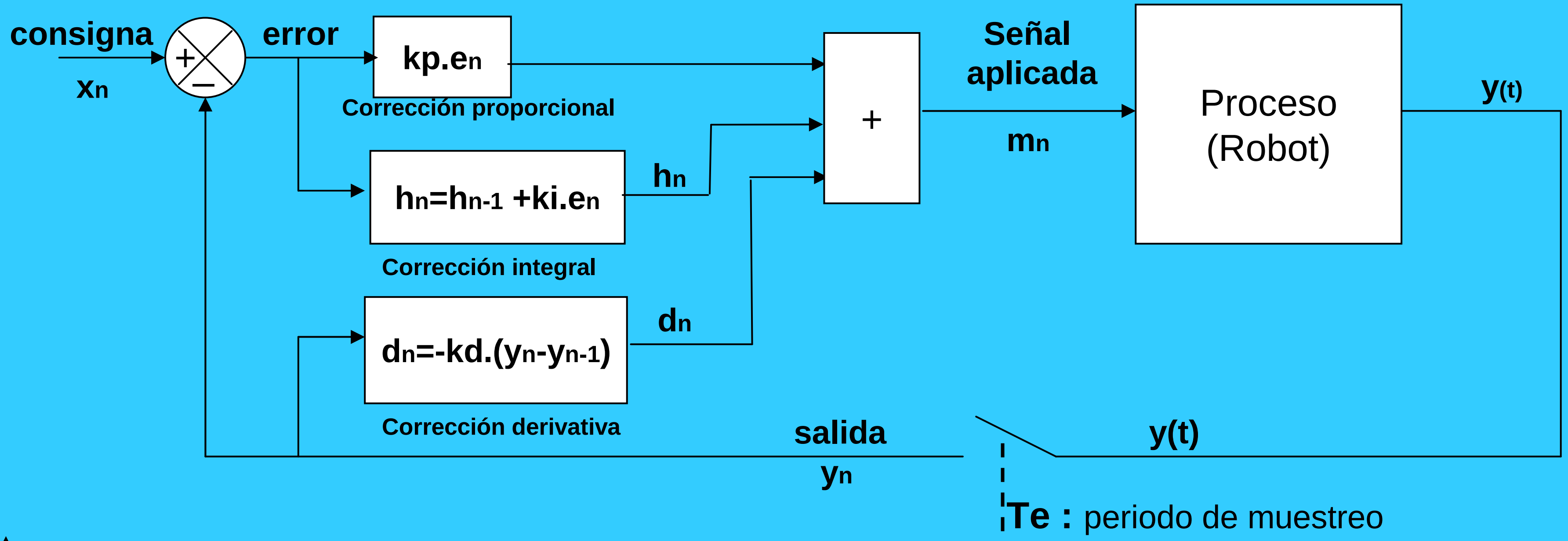


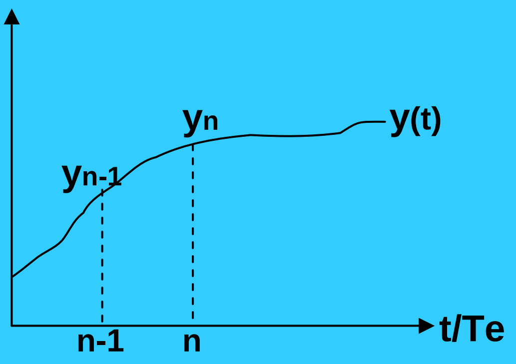
En un PID clásico, termino derivativo = kd.de/dt = kd.(dx/dt - dy/dt)

En un PID modificado, termino derivativo = - kd. dy/dt (nos olvidamos de dx/dt)

Control discreto con un regulador PID digital

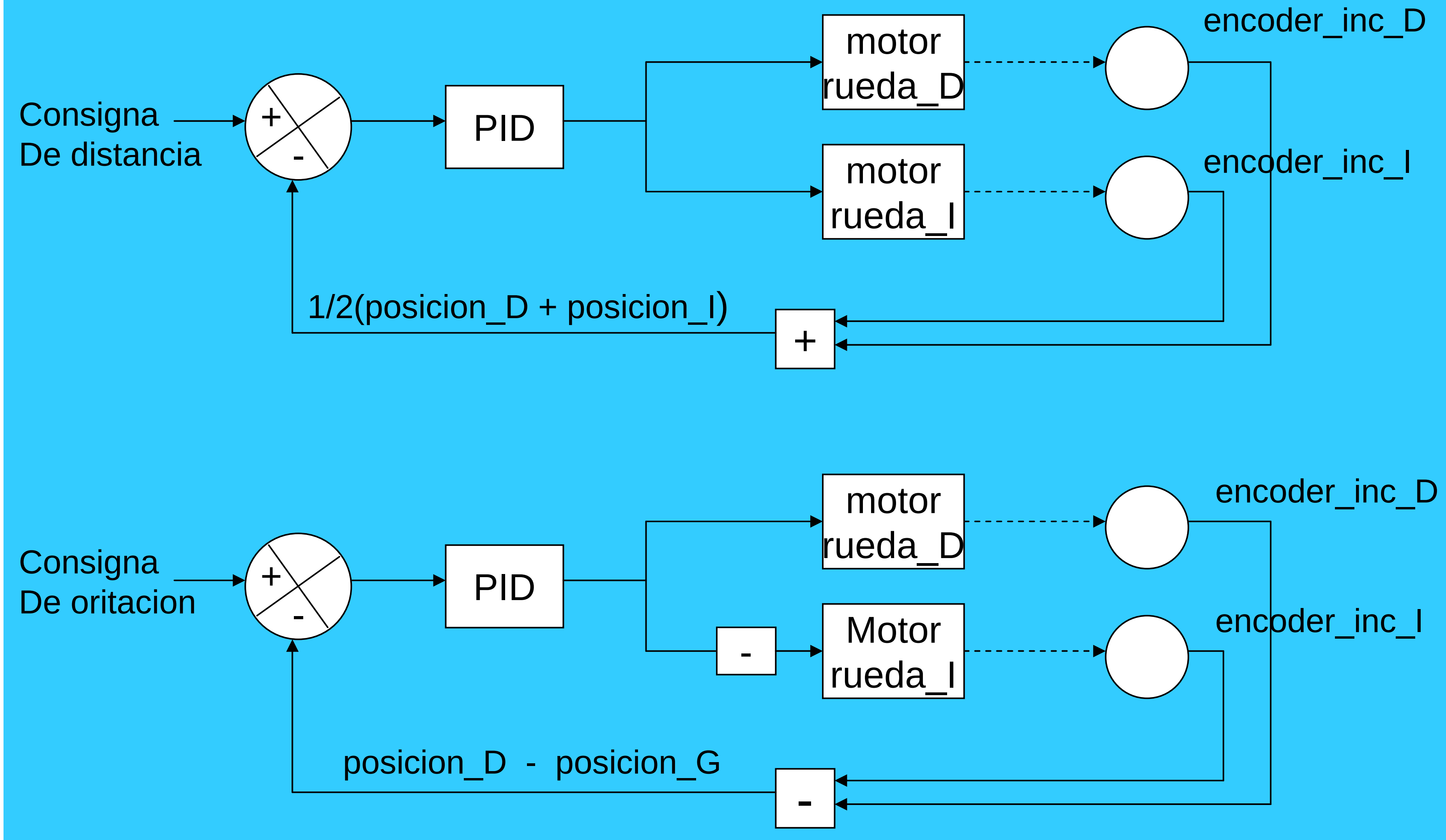
(presentación del controlador con control derivativo de la salida)





Señal aplicada:	$m_n= kp.e_n + h_n + d_n$
Termino proporcional:	$kp.e_n$
Termino integral:	$h_n = h_{n-1} + ki.e_n$
Termino derivativo:	$d_n = -kd.(y_n - y_{n-1})$

Principio de un controlador polar



Control en distancia

Para calcular la distancia recorrida por el robot, vamos a calcular la distancia recorrida por las ruedas de los encoders. De esta manera, se obtiene la distancia recorrida por el centro del eje.

El control en distancia consiste en enviar una nueva consigna cada periodo de muestreo a los motores basada en la diferencia entre la distancia real y la distancia deseada (llamado consigna de distancia)

Algoritmo de control en distancia

Sin término integral y con una control derivativo directamente aplicado a la salida.

distancia = (rueda_d + rueda_i) /2
velocidad= (velocidad_rueda_d + velocidad_rueda_i)/2
error = consigna_distancia - distancia
señal = error * **GANANCIA_PROPORCIONAL_DISTANCIA**
señál_distancia = señal – **GANANCIA_DERIVATIVA_DISTANCIA***velocidad
señal_rueda_D= señal_distancia
señal_rueda_I= señal_distancia

Control en orientación

La orientación del robot se obtiene por la diferencia de la distancia recorrida de los encoders en cada período de muestreo, este enfoque se compara con la orientación de referencia. De la diferencia correspondiente, se calcula una señal de orientación que es enviada a los dos motores (la del motor izquierdo con signo negativo)

Algoritmo del control de orientación

orientacion = rueda_D – rueda_I
velocidad_angular=velocidad_rueda_D – velocidad_rueda_I
error = consigna_orientacion - orientacion
señal = error * **GANANCIA_PROPORCIONAL_ROTACION**
señal_rotacion = señal - **GANANCIA_DERVATIVA_ROTACION***velocidad_angular
señal_rueda_D= señal_rotacion
señal_rueda_I= - señal_rotacion

Algoritmo completo del control polar

```
distancia = (rueda_d + rueda_i) /2
velocidad= (velocidad_rueda_d + velocidad_rueda_i)/2
error = consigna_distancia - distancia
señal = error * GANANCIA_PROPORCIONAL_DISTANCIA
señal_distancia = señal – GANANCIA_DERIVATIVA_DISTANCIA*velocidad

orientacion = rueda_D – rueda_I
velocidad_angular=velocidad_rueda_D – velocidad_rueda_I
error = consigna_orientacion - orientacion
señal = error * GANANCIA_PROPORCIONAL_ROTACION
señal_rotacion = señal - GANANCIA_DERVATIVA_ROTACION*velocidad_angular

señal_rueda_D =  señal_distancia + señal_rotacion
señal_rueda_I  =   señal_distancia  - señal_rotacion
```

(Algunas partes son de transparencias anteriores)

Cambio del sistema de unidades

Sistema de unidades SI (sistema internacional):

Distancia:	**d**:	distancia recorrida:	(m)
Velocidad:	**vel**:	distancia recorrida por segundo	(m/s)
Aceleración:	**acc**:	variación de la **vel** por segundo	(m/s^2)

Sistema de unidades del robot:

Distancia:	**d_rob**:	numero de pulsos del encoder
Velocidad:	**vel_rob**:	número de pulsos por periodo **Te**
Aceleración:	**acc_rob**:	variacion de **vel_rob** por periodo **Te**

Formules de passage

d_rob = K * d
vel_rob = (K*Te) * vel
acc_rob = ($K*Te^2$) * acc

K=(N*Mult)/(π*D)

N: numero de pulsos del encoder
Mult: coeficiente de multiplicacion (1 o 2 o 4) dados por la cuadratura
D: Diametro de la rueda del encoder
Te: periodo de muestreo

Ejemplo

N=1000
Mult=4 (Utilizando cuadratura x4)
D=6 cm
Te=5 ms

K= 21220
K*Te = 106
$K*Te^2$= 0.53

Utilizando el ejemplo anterior:

N=1000		
Mult=4	K= 21220	d_rob = 21220*d
D=6 cm	K*Te = 106	vel_rob = 106*vel
Te=5 ms	$K*Te^2$= 0.53	acc_rob= 0.53*acc

Por ejemplo, si desea una velocidad de 1 m/s con una aceleración de 0,3g se obtiene:

vel_rob = 106 Una variación de 106 pulsos del encoder en 5ms
acc_rob= 0.53*3= 1.6 Una variacion de **vel_rob** de 1,6 en 5ms

Este ejemplo muestra que tenemos que trabajar con variables con decimales que pueden causar problemas de cálculo. Si queremos redondearla, es decir, de 1,6 podemos pasar a 1 o a 2, lo que supone un incremento o decremento del 25% sobre el valor de la aceleración.
Una solución para que estas variables permanezcan intactas pero que sean de tipo entero, es introducir mediante software un multiplicador K, por ejemplo de 8, por lo que las fórmulas se transforman en:

d_rob = 169760*d
vel_rob = 848*vit
acc_rob = 4.24*acc

Considerando de nuevo el ejemplo con una aceleración de 0,3 g, da:
acc_rob = 4.24*3 = 12.72 podemos aproximar a 12 por ejemplo
(no he sido muy optimista en esta ocasión...)

Transposición a funciones del tiempo

Esta es la función de transposición de la distancia, de tiempo, velocidad, aceleración de un sistema de unidad a otra.
Para poner el sistema SI para el sistema de robot, simplemente reemplace **t** por **n**
Para mover el sistema SI sistema de robot, basta con sustituir **n** por **t**

(n=t/Te : número de períodos de muestreo)

Ejemplo: Para las fases de aceleración y frenado:

Sistema SI	↔	Sistema robot
$d = \frac{1}{2}. acc.t^2$ $v = acc.t$ $v_2^2 - v_1^2 = 2. acc.d$		$d\_rob = \frac{1}{2} . acc\_rob . n^2$ $v\_rob = acc\_rob . n$ $v\_rob_2^2 - v\_rob_1^2 = 2. acc\_rob . d\_rob$

Fase de velocidad constante:

$d = v . t$ ↔ $d\_rob = v\_rob . n$

Algunos resultados experimentales

Los test son efectuados con el robot del 2007, en una versión ligeramente modificada de 12,7 Kg.

La función utilizada para realizar los test es la siguiente:

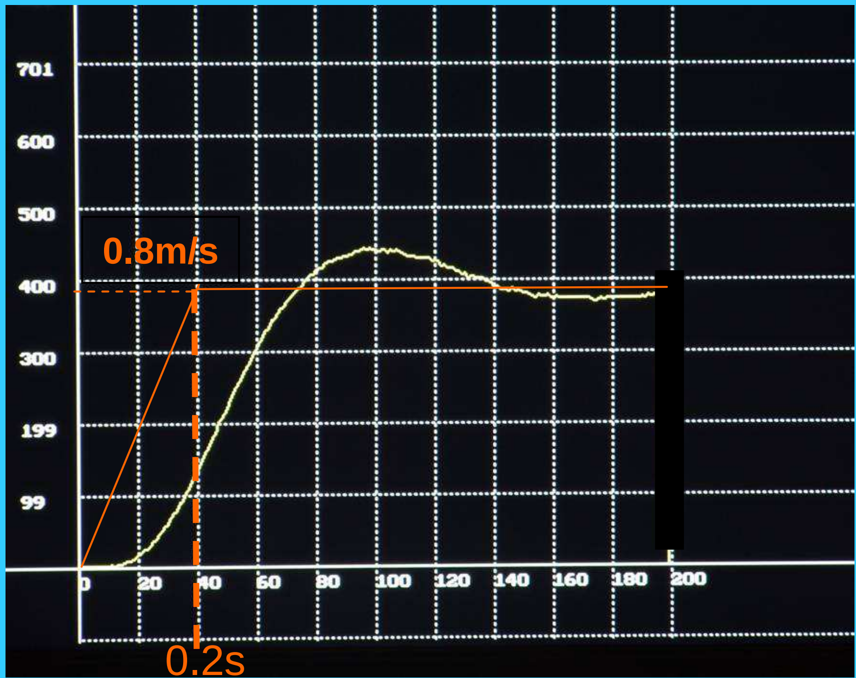
recto_con_frenado(50*COEF_D, 0.8*COEF_V, 4.2*COEF_ACC);

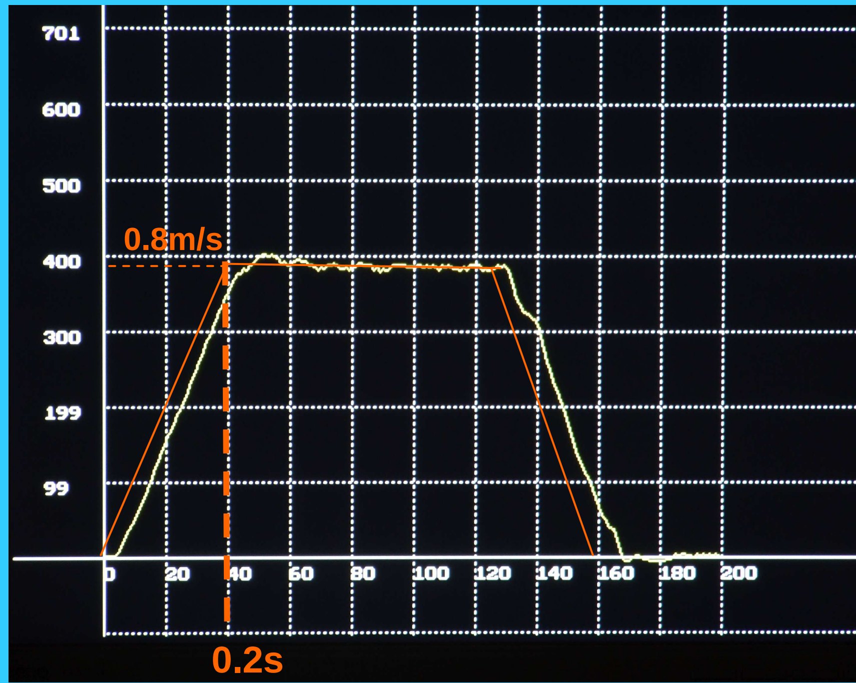
Se han inpuesto las siguientes consignas cinemáticas:
distancia a recorrer: **50 cm**
velocidad: **0.8 m/s**
aceleración: **4.2 m/s²**

El controlador montado es de tipo PD. (el término integrál está anulado).

La influencia del término derivativo

A continuación se representa la variación de la velocidad con la referencia trapezoidal para ambos controladores.





Corrector proporcional simple

kp=0.1

Corrector proporcional y derivativo

kp=0.5 kd=7

La influencia del término derivativo es siginificativa.

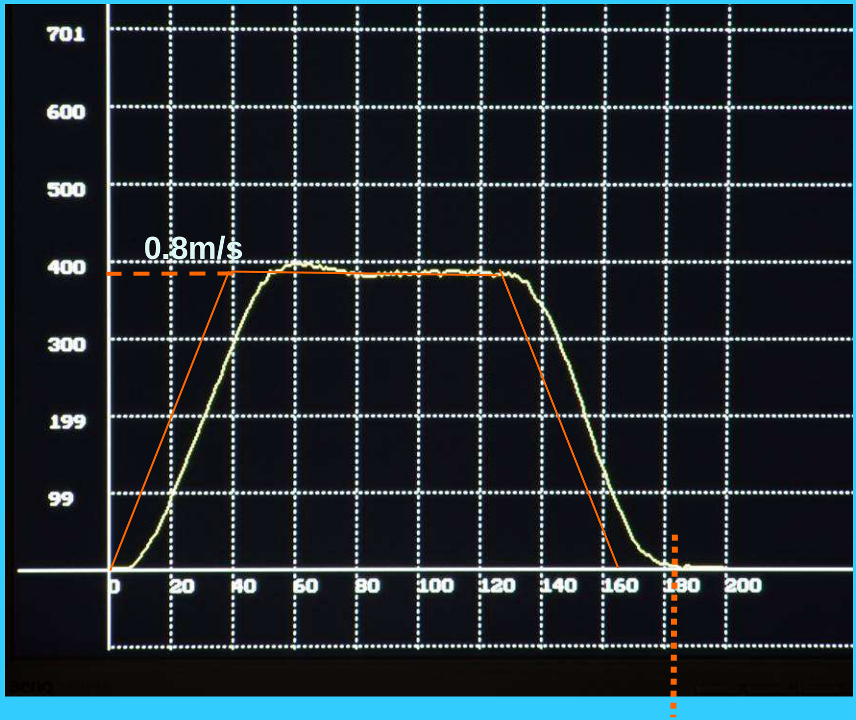
Notese el **factor 5** a aplicar sobre el valor de ganancia Kp al añador el término derivativo.

Debe tenerse en cuenta que la escala de tiempo es la misma para ambas gráficas (como en el controlador proporcional no llega a estabilizarse en velocidad no da tiempo a que en la gráfica entre el proceso de frenado.

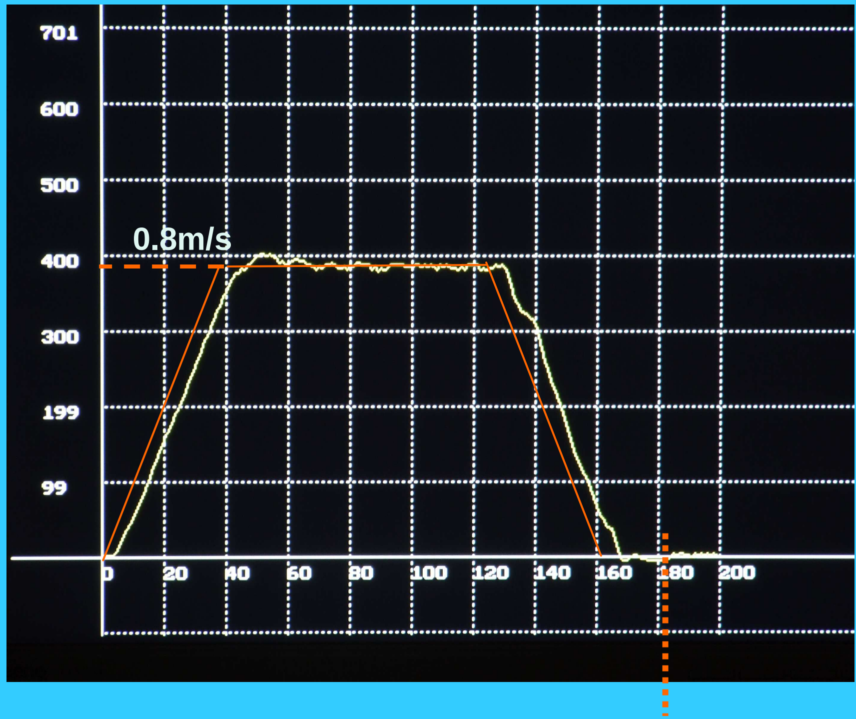
Comparación entre el controlador con parte derivativa sobre la salida y un controlador PD clásico.

Se verán los dos controladores en las mismas condiciones, cada uno de ellos han sido optimizados en términos de ganancias proporcionales y derivativas.

Comparativa de curvas de velocidad



Tiempo: 0.8s



Tiempo: 0.8s

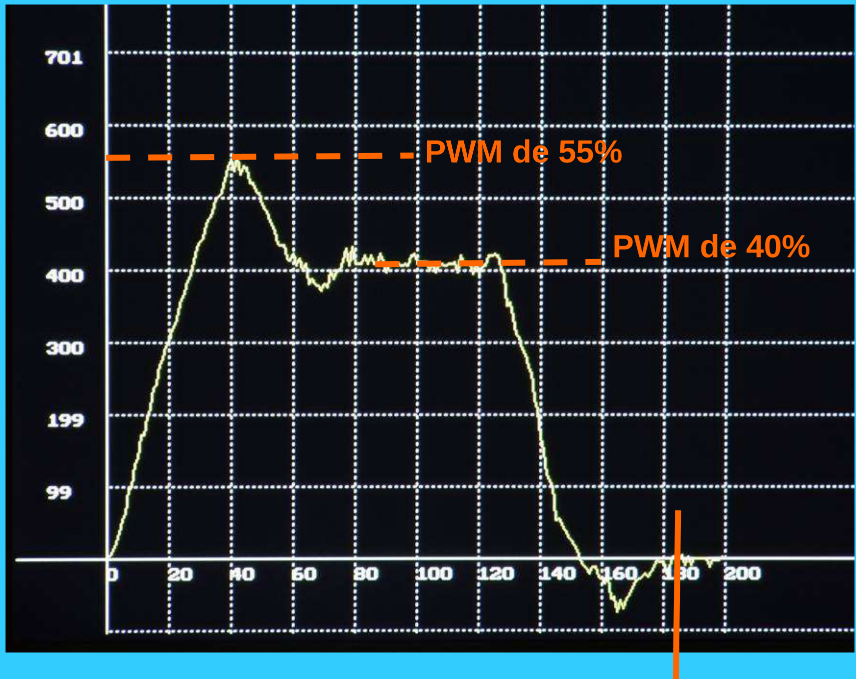
<u>Controlador derivativo sobre la salida</u>
Constantes del controlador : kp=0.7 kd=5.2

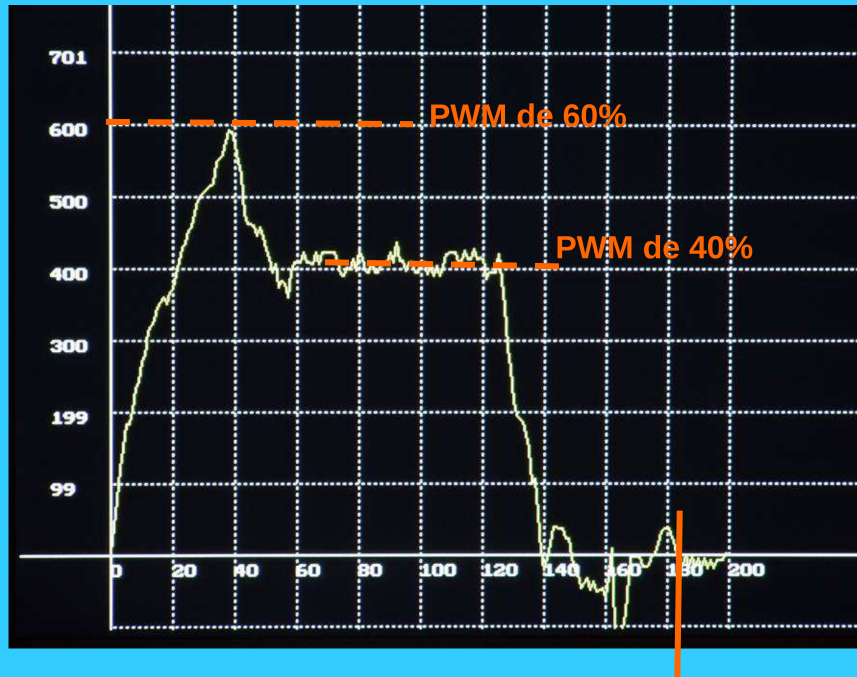
<u>Controlador PD clásico</u>
Constantes del controlador : kp=0.5 kd=7

La corrección por control derivativo de la salida permite un control suave.
La corrección clásica parece más eficiente en términos de acumulación de errores. En contra de la velocidad es ruidosa, especialmente al final del frenado.
A medida que la salida se estabiliza a cero los tiempos de viaje son estrictamente iguales.

Comparativa de las curvas de control

Estas curvas muestran la tensión aplicada a los motores





Tiempo: 0.8s

Tiempo: 0.8s

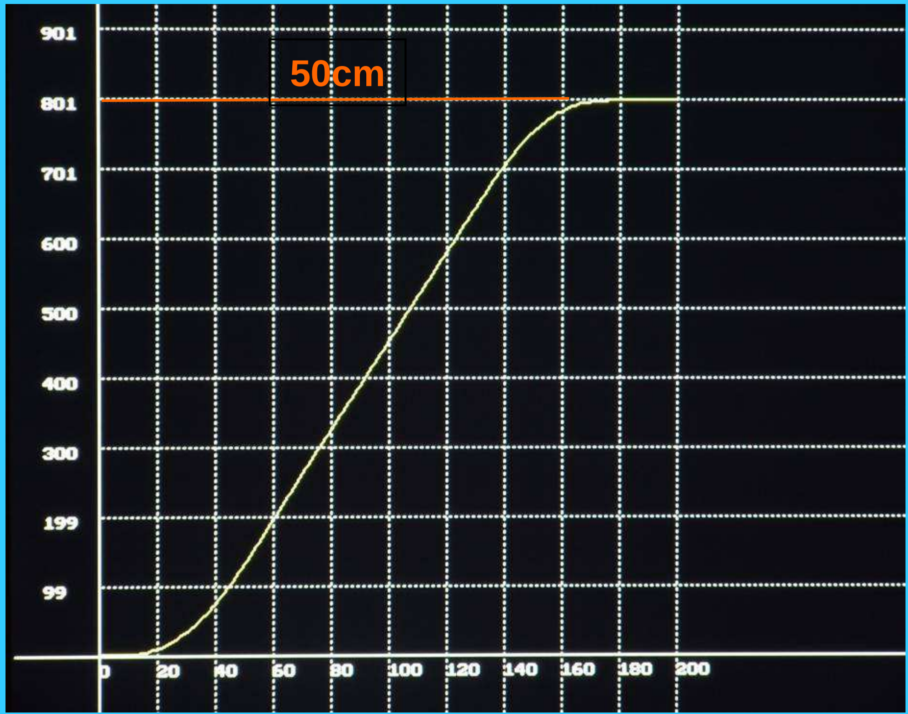
Corrector con control derivativo de la salida

Corrector PD clásico

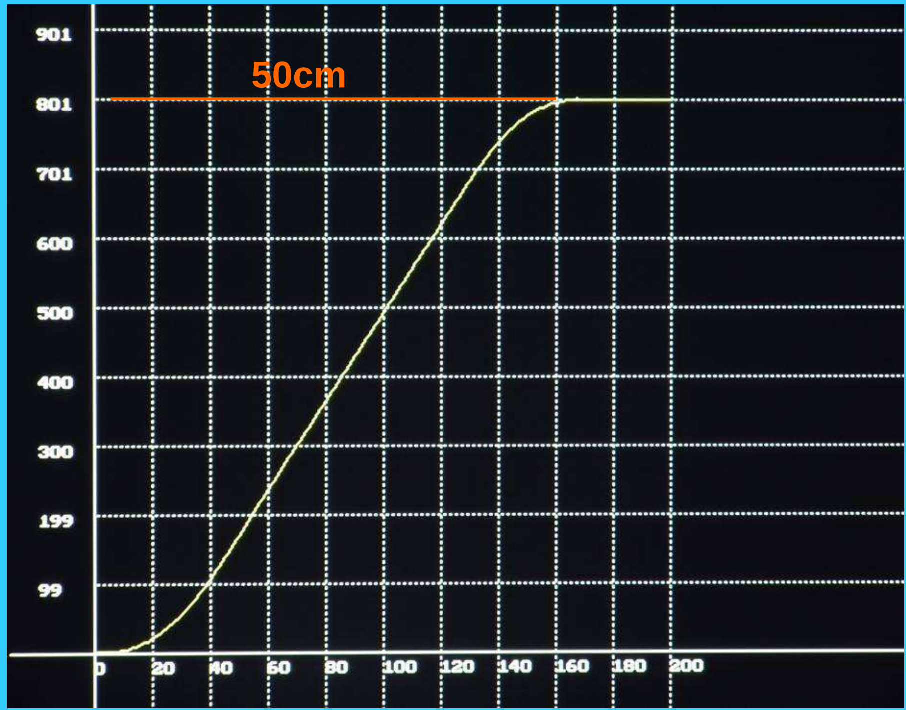
Nos encontramos con un controlador más ruidoso en corrector clásico. Al final, no frena bien y se producen vibraciones.

El máximo nivel de señal es ligeramente superior con el controlador clásico, lo cual tiene sentido, porque el controlador siendo más nervioso requiere más voltaje.

Comparativa de curvas de distancia



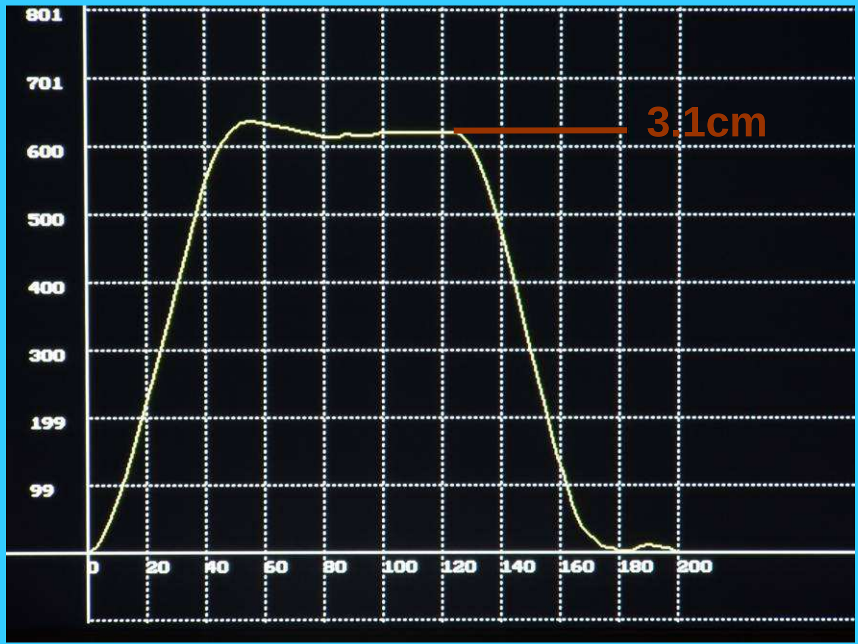
Corrector con control derivativo de la salida

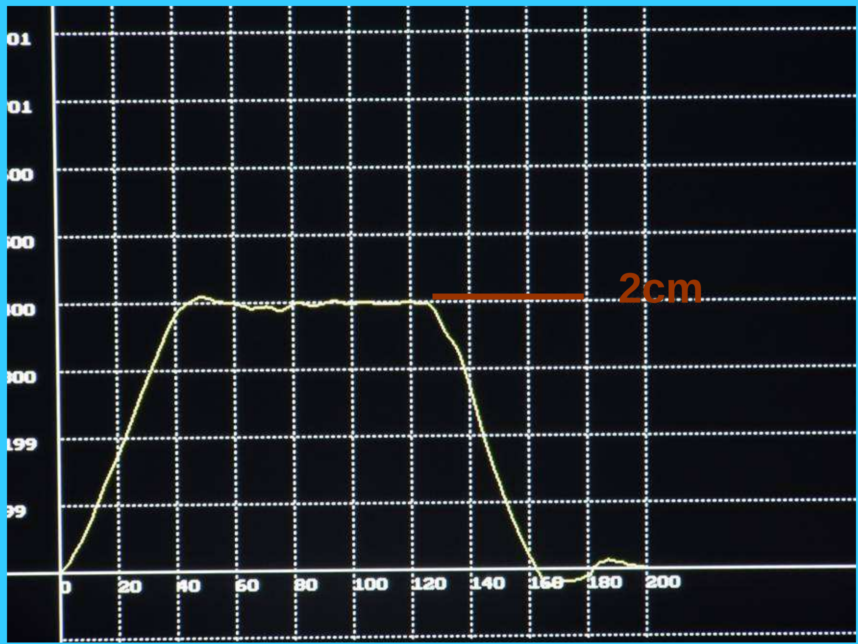


Corrector PD clásico

Encontramos fases de aceleración y frenado un poco más rápido con el mando clásico. Sin embargo, ambos obtienen la misma aceleración (4,2 m / s ^{2}).
Nos encontramos con una ligera vibración a finales de frenado para el corrector clásico que no es visible a esta escala (unos pocos milímetros que solo son perceptibles a través de la observación directa del robot).

Error = consigna de distancia - distancia





Control derivativo sobre la salida

Control PD clásico

Sobre el término integral

La elección del controlador PD o PID queda a su elección, pero debe saber, desde un punto de vista teórico que:

Las ventajas de un término integral son:

-> Mejora la precisión en régimen permanente.

-> Responte eficazmente a las perturbaciones.

Las desventajas son:

-> Tendencia a desestabilizar el bucle.

-> Introduce el fenómeno de windup (ampliamente discutido en el foro).

El término integral suele ser muy utilizado en procesos industriales donde la respuesta a perturbaciones es muy importante.

En un sistema de Eurobot, su uso es cuestionable.

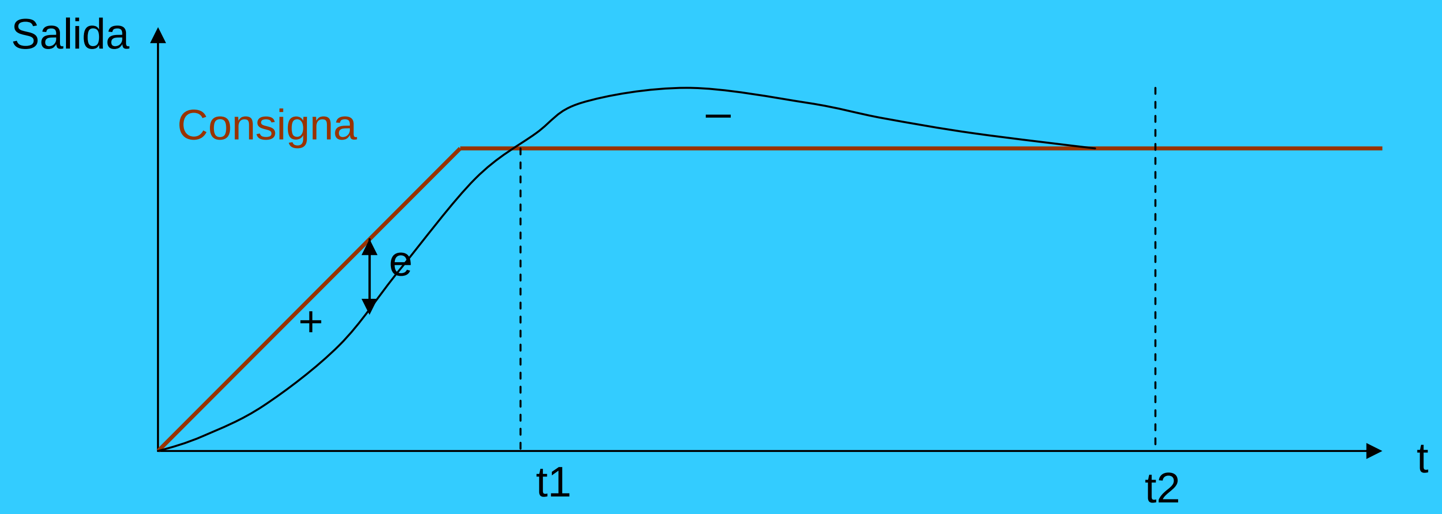
Usted conoce nuestro punto de vista sobre el asunto:

→ El windup tiende a crear reacciones bruscas y sin control cuando la perturbación cesa. Existen sistemas antiwindup.

→ Cuando se habla de perturbaciones en eurobot, nos referimos a cuando se bloquea una rueda (por el choque contra un oponente o una pared por ejemplo) y si se ha seleccionado correctamente la reductora del motor, un término integral adicional no introduce nada.

→ Sobre el efecto de desestabilización (que parece inevitable...), una demostración muy simple se puede demostrar:

Se asume un perfil trapezoidal de la distancia para simplificar la figura



e= consigna – salida (**e**: error de bucle)

h= ki.∫ e.dt (**h**: termino integral)

Supongamos que el error es nulo en regimen permanente, el robot se ha detenido (este es el caso de un robot de Eurobot)

Si para t>t2, el error del bucle es nulo, el termino integran h es necesariamente nulo, sino una tensión estaría siendo aplicada a los motores y el robot no se habría detenido.

El valor de h en el instante t2 es cero. Esto implica que las dos areas representadas por los signos + y – en la figura se anulan.

Como de t=0 a t=t1 la salida está por debajo del punto de ajuste, a partir de t1, la salida se hace mayor que el punto de ajuste para compensar, este aspecto es inevitable. Pero en un robot de Eurobot un sobreimpulso en un fin de frenada implica que el robot va a recular.☹

Capítulo 9

Respuesta a algunas preguntas típicas

Después de ver todos estos temas vamos a ver cuales pueden ser las típicas preguntas que uno puede hacerse.

A continuación responderé a las típicas dudas que he recibido de participantes de eurobot en los últimos años o que se me han ocurrido mientras redactaba este documento.

<u>Pregunta 1</u>

En los 7 primeros capítulos se ha abordado la problemática en desplazamientos lineales, ¿por qué no se habla de desplazamientos angulares?

<u>Respuesta 1</u>

Hay una mala y una buena noticia:

La mala noticia es que el estudio cinemático de la rotación es infinitamente más complejo que el lineal. La energía mecánica de un robot en desplazamiento lineal viene dada por la energía cinética que es **$\frac{1}{2}M.v^2$** (en movimientos lineales la transferencia de masas se puede calcular facilmente como hemos visto anteriormente). Sin embargo para un robot en rotación la energía cinética viene dada por **$\frac{1}{2}$ $J.w^2$**. La diferencia está ahí, la masa se puede evaluar con facilidad, se mide en equilibrio, mientras que el momento de inercia viene dado por **$J=\sum m.r^2$**, y es realmente un problema medirlo ya que no hay equilibrio cuando hay inercia, y el comportamiento dinámico del robot, si evaluamos la transferencia de masas, se convierte en un verdadero quebradero de cabeza.

Una buena razón, por la que tiene que sentirse aliviado es que las rotaciones en un robot Eurobot plantean menos problemas que los desplazamientos lineales.

El robot se colocan en un hambiente ostil, se deben evitar constantemente bordes, totems, porterías, robots oponentes, etc. La vulnerabilidad del robot frente a estos riesgos es mayor en desplazamientos lineales que en rotación. En desplazamiento lineal un robot va a deber adaptar su velocidad sin interrupción. No abordamos una pared en la misma velocidad que cuando nos desplazamos por medio del campo (aunque algunos lo hacen…). No abordamos tampoco al adversario a velocidad máxima (aunque algunos lo hacen…). Para la rotación los riesgos de bloqueo son reducidos. Si el robot es cilíndrico y gira alrededor de su centro, los riesgos hasta son nulos. Por tanto, podemos adoptar un único valor de la velocidad angular y válido para toda la duración del partido. Lo mismo ocurre con la aceleración. Que simplifica los problemas de la elección para la rotación.

Pregunta 2:

En la diapositiva 5, se dice que Fx=0 cuando la aceleración es nula. Esto significa que el robot funciona a velocidad constante y que la fuerta de tracción es nula. Según tengo entendido, si los motores no ofrecen potencia al robot, este robot no puede moverse, por lo que haciendo una analogía podriamos imaginarnos un robot moviendose a 1m/s sin motores una vez que ha alcanzado la velocidad deseada.

Respuesta 2:

Una vez que los motores han acelerado el robot a la velocidad de 1 m/s. A continuación, en la fase de velocidad constante, la fuerza real ejercida por las ruedas es cero (la ecuación fundamental de la mecánica Fx = M * a es inevitable), pero los motores deben proporcionar un par de torsión para compensar las pérdidas por fricción (cepillos colector, reductores, rodamientos ...) lo que no podemos imaginar es un robot sin pérdidas…

Pregunta 3:

En la diapositiva 6 se dice que el coeficiente de aderencia de las ruerdas puede superar el valor límite de 1, esto es posible?

Respuesta 3:

Si es posible. De hecho, el límite de ka = 1, se aplica a los sólidos no deformables. En el caso de los neumáticos sobre el asfalto o madera pintada, aparece un fenómeno de microdesformaciones. El neumático en contacto con el suelo se deforma y se acopla en el terreno desigual, sobre todo porque el neumático se introduce dentro de las microdesformaciones del terreno, cuanto menos shores tiene el neumático mas notable es este efecto, pero mayor será la degradación del mismo. Eso lo explica todo.

Pregunta 4:

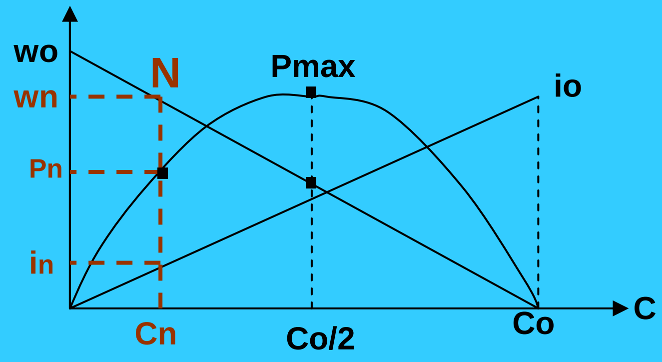
En cuanto a no utilizar el motor para bloquear las ruedas en el método del cubo para calcular el coeficiente de aderencia de las ruedas, ¿sería posible bloquear las ruedas con el motor y con un dedo medir la temperatura del motor y pararlo cuando se note caliente?

Respuesta 4:

Creo que estar cometiendo un gran error haciendo eso. La constante térmica de la carcasa de los motores suele rondar los 700 segundos. Mientras el estator está frio el rotor puede estar achicharrandose por lo que te has quedado sin motor antes de notar con el dedo que está caliente. Siempre si se van a bloquear las ruedas ha de ser mecánicamente.

Pregunta 5:

En la diapositiva 27, se dice que la potencia mecánica disponible en el motor es máxima cuando Vcc se divide por igual entre la parte ohmica (r.i) y la de velocidad (Kv.w). ¿Qué valor tiene y qué relación hay con la potencia nominal del motor?



Respuesta 5:

Vcc=r.i + Kv.w (1)

M=Km.i (2)

Pm=M.w (3) representa la potencia mecánica entregada por el motor.

De las ecuaciones 1, 2 y 3 podemos deducir:

Pm=Vcc.M – (r/Km).M²

El máximo de **Pm** en función de M se obtiene cuando **dPm/dM=0,** después de derivar:

M= ½ Km.Vcc/r = ½ Km .io = ½ Co

io representa la corriente de arranque y **Co** el par de arranque

La máxima **Pm** corresponte a **C = ½Co** y **w = ½wo**, lo que demuestra que los términos r.i y Kv.w son iguales (Vcc se divide por igual en dos términos) y

Pmax = ¼ Co.wo (**Co** par de arranque, **wo** velocidad angular de vacío)

Si tomamos como ejemplo el RE025 motor de 24v, da:

Co=241mNm

wo=9550rpm/min=1000rad/s

Pmax=60w en comparación con la potencia nominal de 20W .

La potencia nominal **Pn** se da como una potencia constante tolerable en términos de temperatura del rotor. Corresponde a los valores de rojo en el gráfico y es muy por debajo del máximo.

Pregunta 6:
¿De dónde sale Kv=Km? ¿Estás seguro de esto?
Respuesta 6:
He tomado varios ejemplos de motores para mostrarselo. Es verdad que debería haberlo demostrado, pero reconozco mi incompetencia para ello. Rebuscando en la memoria vienen a mi mente algunas viejas formulas de motores:

e= d(FLUX)/dt y M=FLUX.i
FLUX : Flujo magnético para crear el campo magnético B
e: fem inducida por la variación de flujo, tambíén se podria decir que e=FLUX.w
M: par inducido por la fuerza de Laplace.

Si comparamos M=Km.i con M=FLUX.i y e=Kv.w con e=FLUX.w
Parecen ser muy parecidos, por lo que podemos demostrar que:
Km y Kv dependen del flujo magnético. (el creado por el estátor)
La unidad del flujo es el Weber que se expresa en [v].[s], Kv se expresa en V/rd/s la cual se parece bastante
Para Km, es menos evidente, pero finalmente he comrpobado que Nm/A proporciona [v].[s]

Pregunta 5 bis:
Pero entonces, ¿por qué se utilizan los dos coeficientes?
Respuesta 5 bis:
Por razones prácticas, cuando tratas temas relacionados con el par debes usar Km ya que da resultados de Nm para una corriente suministrada, y cuando se tratan temas relacionado con la velocidad debes usar Kv ya que da resultados de rad/seg para unos voltios aplicados

<u>Pregunta 7:</u>
En múltiples expresiones aparece la tensión de la batería Vcc, ¿esta debe de ser la misma que la tensión nominal del motor?

<u>Respuesta 7:</u>
Es casi imposible tener una tensión de batería igual a la tensión nominal del motor. A lo sumo, podemos tratar de acercarnos a ella.

Para una batería de LIPO, cada celda proporciona una tensión de 3.7v a 4.2v en plena carga, la tensión final de la batería será un múltiplo de esa expresión en función de la cantidad de celdas que tenga.
Para un motor de 24v: 6 celdas de LIPO dan 22v mínimo y 25.2v max
7 celdas de LIPO dan 26v mínimo y 29.4v max
Para el NiMH, es el mismo problema con variaciones importantes de la tensión que sigue el estado de carga. Si se da por sentado que antes de cada partido, se va con las baterías cargadas, conocemos entonces la tensión batería Vcc efectiva (25.2v con una batería LIPO a 6 elementos por ejemplo). Lo que hace falta saber es que sobrepasar la tensión nominal del motor es perfectamente posible a condición de no exagerar.
Existen dos causas por las que puede romperse un motor:

→ Sobrepasar la temperatura límite del rotor: destrucción del robot por sobrecalentamiento
→ Sobrepasar la velocidad límite del rotor : destrucción del bobinado del rotor por contacto con el estátor.

Si la tensión de la batería supera la nominal del motor pueden darse estos dos casos.
El riesgo de sobrecalentamiento puede evitarse si se tienen en cuenta los cálculos realizados en este documento. Sin embargo el riesgo de sobretensión puede darse si tenemos un bug software que aplique toda la tensión de la batería al motor.

Pregunta 8:

Son muy interesantes todas estas fórmulas, pero que hacer si utilizo moto-reductores sin ningún dato técnico.

Respuesta 8:

Si usted es un creyente, usted puede orar. ☺

En algunos casos podemos saber su tensión nomilal. Esto es lo mínimo que deberíamos saber.

También podemos estimar la resistencia interna midiendo sobre los bornes. También se puede estimar la relación de reducción si tenemos acceso al eje del motor (midiendo la relación entre las vueltas del eje del motor y de la reductora).

Para el calculo de las constantes debemos seguir los siguientes pasos, basados en la fórmula $U= r.i +K_v.w$

Aplicamos una tensión U (por ejemplo la mitad de la nominal), el motor girará

Medimos la corriente que consume (su valor será baja dado que el motor está funcionando en vacio sin carga).

Contamos el numero de vueltas en 1 minuto del eje de salida de la reductora. Sabiendo la relación de reducción podemos calcular las revoluciones del motor. Con esto podemos calcular Kv mediante la expresión v =(U-r.i)/w

Sabiendo que Km=Kv, podemos calcular la constante temporal del motor.

Incluso podemos calcular la corriente y el par de arranque:

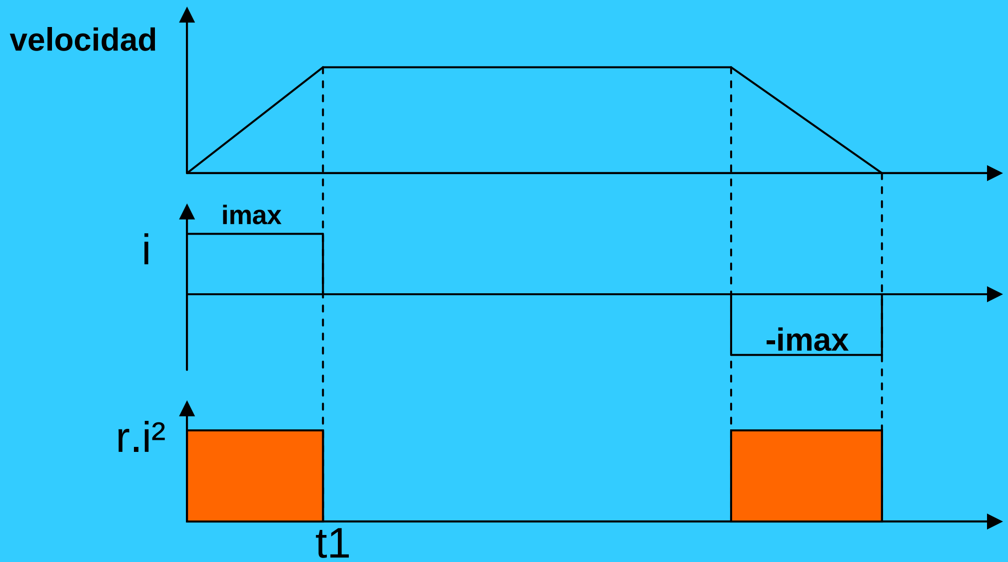
io=Vcc/r: corriente de arranque.

Mo=Km.io: par de arranque

wmax: velocidad angular máxima, es la velocidad de vacio cuando aplicamos la te nominal al motor.

Pregunta 9:
¿Por qué el motor se calienta más cuando mas abrupta es la consigna que aplicamos al motor?
Respuesta 9:

El motor se calienta en las aceleraciones y deceleraciones. En términos absolutos, si la aceleración es igual, las parejas (aceleración y deceleraciones) son iguales por lo que las corrientes son iguales.



Durante la aceleración
$U = r.imax + Kv.w$

Durante la frenada
$U = -r.imax + Kv.w$

Por lo tanto, en realidad la tensión U no solo es mayor durante la aceleración y el frenado, sino también la energía térmica consumida a $r.i^2$. T1 (área roja) es la misma durante la aceleración y el frenado.

<u>Pregunta 10:</u>

Si he entendido bien, en la transparencia 40, para un motor con una reductora dada, la elección de la correspondiente aceleración y velocidad máxima se bbasa en la ecuación **vmax = vo .(1– amax/ao)**

Por lo que para una potencia dada, si quiero aumentar la aceleración debo disminuir la velocidad máxima.

<u>Respuesta 10:</u>

Lo has comprendido bien.

<u>Pregunta 11:</u>

¿Y cómo elijo este par de valores. ¿Cuál de estas dos variables es más importante?

<u>Respuesta 11:</u>

Todo depende de la distancia a recorrer.

Para viajes cortos, es ventajoso tener aceleración (por supuesto, la aceleración máxima sin que patinen las ruedas o que el robot haga caballito) .

Para viajes más largos (cruzando el campo, por ejemplo), es ventajoso tener una alta velocidad.

Uno puede imaginar un programa para optimizar la aceleración y la velocidad máxima de acuerdo con la distancia. No es complicado para escribir.

Pregunta 12:

Resumo: he escogido mi motor y mi reductora con el fin de tener suficiente aceleración y velocidad máxima. A continuación he seleccionado la velocidad y la aceleración máxima para evitar la saturación del controlador y no derrapar o hacer caballito. Pero dado que el motor se calienta durante la aceleración y el frenado lo justo durante 1minuto30 de partido para no quemarse, ¿puedo decir lo mismo del driver de potencia?

Respuesta 12:

Tu pregunta es compleja, « vamos » a tratar de responderla.

La temperatura medida por los motores y amplificadores de potencia sobre la duración de un partido dependerá del ciclo de trabajo. Para unos motores y el robot del mismo peso, un robot hiperactivo se calentarán más que un robot que funciona mas suave. Pero siempre se puede considerar el peor de los casos.

La forma más fácil responder a la pregunta es hacer un balance de energía:

Durante el funcionamiento del robot, se producen unos intercambios entre la energía eléctrica, energía térmica y energía mecnánica.

La energía eléctrica Ee es suministrada por la batería. La energía térmica Et es disipada por ejecto Joule en los motores y amplificadores de potencia y también por fricción. Por último la energía megánica corresponde a la energía cinética del robot Ec.

En la fase de aceleración: las baterias proporcionan energía eléctrica a los motores y estos la transforman en energía cinética menos las perdidas por energía térmica disipada por efecto Joule. $Ee= Et + Ec$
En la fase de frenada: El robot transforma su energía cinética en energía eléctrica, toda esta energía es disipada en forma de calor en el motor y en los amplificadores. $Ec+Ee = Et$
En la fase de velocidad constante: la batería suministra energía para compensar las pérdidas por efecto Joule y por fricción (rodamientos, reductoras, etc). $Ee=Et$
Robot detenido: $Ee=EJ=Ec=0$

Equilibrio durante la fase de aceleración:

Al finalizar la aceleración, el robot adquiere una energía cinética que viene dada por:

$$Ec=\frac{1}{2} M.vmax^2$$

Es importante notar que esta energía no depende de la aceleración a la cual el robot adquirió esa velocidad.

Por ejemplo:

M =14 kg
K =20 relación de reducción.
r =2.34ohm resistencia de inducido de los motores.
Km =23.5 mNm constante de par.
D=6cm diámetro de las ruedas motrices.

vel_max=1.2 m/s
acc=0.4g

Ec=½ $*14*1.2^2$= **10 julios** equivalente a 2.4 calorias
Puede parecer ridículo en comparación a una ración diaria de comida (en torno a unas 2000 calorías), sin embargo vamos a calcular el tiempo en que el robot consume esas calorías
t1= vel_max/acc = 0.3s
Esto corresponte a una potencia mecánica media durante la fase de aceleración.
Pm = Ec / t1 = 33 w
Ya parece más razonable.
Para calcular la energía térmica disipada en los motores. Como la aceleración es constante, la corriente también lo es. Teniendo en cuenta los dados, la corriente de inducido será (2Fx=M.acc; Mr= Fx.D/2; Mm=Mr/(K.Rd); i= Mm/ Km)
i= 2.5A corriente de inducido del motor
Et1=$2.r.i^2.t1$= **8.8 j** energía disipada por efecto Joule en los dos motores.
Hay que añadir la pérdida de energía en los amplificadores de potencia (Pour LM18200 ra=0.6ohm)
Et2=$2.ra.\ i^2.t1$= **2.25 j**
Et1 + Et2 = 11 j energía total perdida por efecto Joule
Es la potencia suministrada por la batería (la fricción no se ha tenido en cuenta)
Ee=Ec+Ej1+Ej2= **21 j**

En total la batería en aceleración proporciona 21j, 10j cuya utilidad es para la propulsión mecánica del robot hasta su máxima velocidad y 11j en perdidas por efecto Joule.

Fase de frenada

Hemos visto que las pérdidas en el motor son idénticos en la aceleración y el frenado

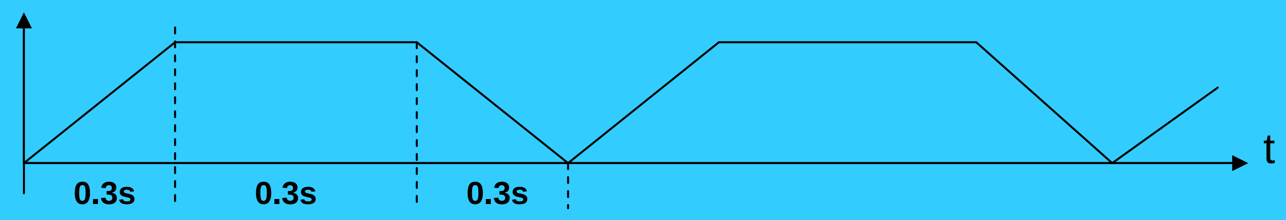
Et1= 8.8j pérdidas por efecto Joule en los motores
Suponiendo que es la misma para los amplificadores
Et2=2.25j
Con un total de energía perdida por efecto Joule:
Et1 + Et2 = 11j
El robot proporciona energía mecánica igual a la energía cinética perdida:
Ec= 10j
Esta energía se disipa en los motores y los amplificadores de potencia.
11j perdidos y 10j gastados para frenar . La batería proporciona la diferencia que es 1j
Ee+Ec= Et1 + Et2

En total en la fase de frenada, el robot entrega 10j, la batería 1j, que son gastados en 8,8j por efecto Joule en el motor y 2,25j por pérdidas en los amplificadores.

Durante la fase de velocidad constante, las pérdidas por efecto Joule son insignificantes.
El saldo total de una secuencia de aceleración y frenado es:

Et1= 2*8.8 = 17.6j perdidas por efecto Joule en los motores
Et2= 2*2.25 = 5.5j perdidas por efecto Joule en los amplificadores
Ee = 21+1 = 22j energía entregada por la batería

Volviendo a la cuestión de saber la temperatura de los motores después 1mn30 partido.
Esto dependerá del ciclo de trabajo:



Supongamos el caso extremo de un robot que se desplaza 40cm, con un factor de aceleración frenada sobre velocidad constante de 2/3. (0.6s para acelerar y frenar, y 0.9s en total para el desplazamiento de 40cm)

Por tanto:

Pt1 = Et1/0.9 = 20 w sobre la potencia media disipara en los dos motores.
Pt2 = Et2/0.9 = 6 w sobre la potencia media disipara en los amplificadores de potencia.

Por lo tanto la potencia media disipada en cada motor es:

Pt=10w

Siendo las constantes térmicas del motor:

Rthr = 3°C/w resistencia térmica rotor-estátor.

Rths= 10°C/w resistencia térmica estátor-ambiente

Constante de tiempo del rotor = 20s

Constante de tiempo del estator = 700s

<u>Aumento de la temperatura del estátor</u>

Pt.Rths = 10*10 = 100°C Desviación de temperatura asintótica entre estator y ambiente

Debido a la constante temporal de 700s, es exponencial y tangencial despues de 90 segundos de partido.

Ts – Ta = 100* 90/700= 13°C

Con Ta= 40°C (Temperatura en la final de La Ferté ☺)

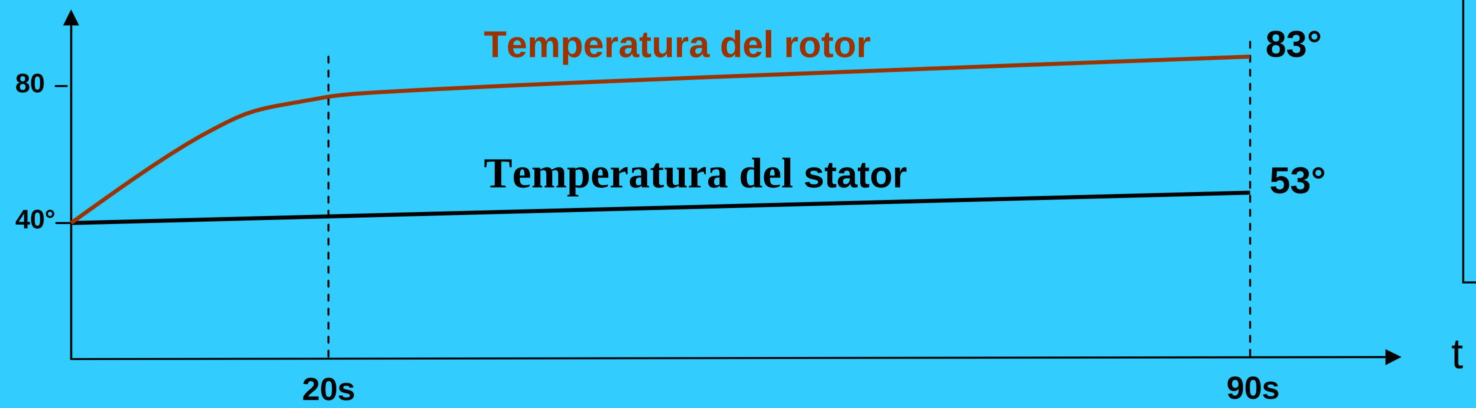
Testator= 53°C

<u>Aumento de la temperatura del rotor</u>

Tr–Ts = Pj.Rthr = 10*3 = 30°C Desviación de temperatura asintótica entre el estátor y el rotor

Esta desviación aparecerá después de 20segundos hasta el final del partido:

Tr= 30 + 53= 83°C



Estas son las curvas de temperatura para un robot hiperactivo y con temprantura ambiente de 40ºC

Pregunta 13:

El error de velocidad, es decir, el error entre la velocidad del robot y la consigna que se pueden ver en las gráficas, ¿no es demasiado error para un controlador que debería ser muy bueno?

Respuesta 13:

En la fase de velocidad constante, la velocidad es igual a su valor deseado. Esto es un primer punto.

Durante las fases de aceleración y frenado la curva va por detrás de la consigna, pero no afecta a la precisión del robot. Es en distancia donde se requiere precisión, lo que justifica la elección de un control de posición en vez de uno de velocidad. La velocidad no tiene impacto en el rendimiento del robot dado que hay un control derivativo sobre la posición.

Por contra en las fases de aceleración y frenada, la distancia está detrás de su objetivo, por lo que esto debe de ser tenido en cuenta en la condición de salida de las funciones de desplazamiento. Cuando la consigna esta alcanzada el robot se encuentra en movimiento.

Pregunta 14:
Viendo las gráficas, me sorprende el nivel de ruido en la consigna del motor y tambien me sorprende, pero en menor medida, el ruido en la velocidad.

Respuesta 14:

Lo que puede ser motivo de preocupación es el ruido de la velocidad. Pero, de hecho, no es la velocidad, es una medida de la velocidad por un algoritmo simple:

velocidad(n)=distancia(n) – distancia(n-1).

Lo que vemos está relacionado con el ruido de cuantificación, y uno se puede imaginar que la velocidad real del robot debido a la constante de tiempo mecánica no está sujeto a estas fluctuaciones.
También se puede reducir el ruido en la frecuencia de muestreo en el orden k:

velocidad(n)=distancia(n) – distancia(n-k).

Pero no hay que exagerar el valor de k. Ya es suficiente y puede jugar papel degradante en el predictor del control derivativo. Uno no predice el futuro muy atrás en el pasado. Si son las 17h y tratas de predecir la predicción meteorológica de las 18 horas, no vamos a remontarnos al tiempo de hace 3 días, sino que vamos a mirar que tiempo hizo a las 16 horas.

Es verdad que si el ruido de velocidad no tiene incidencia sobre el comportamiento del controlador, hay que analizad más detenidamente la odometría. Pero este tema no es abordado en este documento.

<u>Pregunta 15:</u>
No has dicho nada de como configurar el controlador, por lo que se ve lo hace con las gráficas. ¿Si no tengo acceso a las gráficas del robot cómo lo hago?

<u>Respuesta 15:</u>
Un consejo: si no estas dispuesto a comprar un depurador oficial (que entiendo que puede ser muy caro). Existen herramientas de depuración muy sencillas y económicas. Estas herramientas son escenciales para el desarrollo de un proyecto de este tipo. Sin posibilidad de obtener gráficas siempre podremos trabajar, pero el resultado obtenido será mucho menos preciso.

Para el proceso de ajuste de controlador (ampliamente discutido en el foro), se descompone el controlador en los terminos que queremos ajustar. Primero ajustaremos el proporcional, luego el derivativo y posteriormente (y si a usted le interesa) puede ajustar el término integral. Siempre es mejor ajustar primero el controlador de orientación y luego el controlador lineal.

Una de las dificultades reside en el hecho de que para ajustar el servo con precisión, se deben ejecutar secuencias de rotación y posteriormente se ejecutarán las línea recta, el problema justamente esta ahí, si no tenemos bien ajustado el control de ángulo al mover el robot en línea recta tendrá desviaciones laterales. Por ello antes de empezar debemos tener el controlador mas o menos ajustado, aunque sea a ojo.

Esta es una manera muy simple de empezar:

El desplazamiento más simple que hay es el desplazamiento en el que no hay desplazamiento.

Para empezar vamos a dejar el controlador de distancia en una posición fija. No vamos a utilizar ningun perfil trapezoidal. Simplemente vamos a dejar bloqueado el controlador: consigna_distancia=0.

La idea es imponer una condición inicial nula al controlador para t>0 y ver si el robot se mantiene en su posición de inicial de equilibrio.

<u>A: Ajuste del controlador de orientación (consigna_distancia=0)</u>

1. Empezamos ajustando el controlador proporcional (kd=0)

   Partimos de un valor de Kp bajo y vamos aumentando la ganancia a la vez que vamos moviendo el robot de su posición de equilibrio (introducimos una perturbación con la mano). Seguimos aumentando la ganancia Kp hasta que empezamos a ver que hay una oscilación amortiguada. Seguimos aumentando hasta que en las gráficas podamos ver una oscilación amortiguada de 1 a 2 segundos. Este es el valor de Kp con el que debemos de quedarnos (en nuestro caso Kp=0,35)

2. Ahora introducimos el término derivativo

   Vamos aumentando progresivamente el termino derivativo Kd

   Progresivamente aumentamos la ganancia derivativa kd, siempre con mismo procedimiento. Pasamos primero por una fase a oscilatoria amortiguado y luego por una fase perfecta sin sobreoscilación.

   (en nuestro caso kd=2)

Se puede considerar que el ajuste del controlador de orientación está acabado.

B: <u>Ajuste del controlador de distancia</u>

Se utiliza el mismo procedimiento que hemos utilizado anteriormente. Dejamos fijo el controlador de orientación

consigna_orientación=0.

La forma de proceder es la misma que para el controlador de orientación:

1. Ajustamos la constante proporcional (kd=0)

Aumentamos Kp hasta el límite de oscilación. Esta oscilación debe de estar entre 1 y 2 segundos. (en nuestro caso kp=0.5)

2. Introducimos Kd y lo aumentamos hasta que la respuesta sea impecable sin sobreoscilar. (en nuestro caso kd=4)

Se puede considerar que el ajuste del controlador de distancia está acabado.

<u>Comentario general sobre el método de ajuste</u>:

Algunos pueden criticar la agresividad final del controlador. Están en los cierto. Porque hay que obligar al robot a salir de su posición de equilibrio y luego soltarlo.
También está el problema de bloqueo del robot, que se mencionó en el capítulo anterior, el robot se opone enérgicamente a la perturbación del oponente. Su fuerza de reacción aumenta con el valor de kp y también con la amplitud del desplazamiento desde su posición original.

Más allá de un cierto grado de desplazamiento, puede aparecer el deslizamiento de las ruedas.
Por ello se recomienda no excederse en las amplitudes. Por ejemplo:

- 5 a 10º en rotación
- 5 cm para la distancia

Si este método le asusta, es posible proceder de una manera más suave:
Se trata de ejecutar el programa sin poner los motores a máxima potencia.
Se realiza un ajuste del controlador sin validar la potencia máxima. Una vez que tengamos un poco ajustado el controlador podremos proceder a ajustarlo a máxima potencia.

Este método sólo permite una aproximación a las ganancias óptimas, podemos tratar de mejorarlo:
Partiendo de la pareja de valores Kp y Kd, determinados al principio, aumentamos Kp, por ejemplo del 20%, luego debemos aumentar Kd para aumentar la estabilidad. Esto podemos hacerlo sucesivamente hasta el momento en que el término derivado no puede recuperar la estabilidad.

Después de aplicar este método no está todo terminado. Ahora debemos aplicar una consigna trapezoidal a los desplazamientos en rotación y lineales para ajustar un frenado bien controlado. Si se quiere hacer un ajuste fino debemos utilizar las gráficas, lo que nos dará una ventaja más que notable. Pero atención, no hay que imputarle al controlador los defectos de comportamiento ya que podrían provenir de una mala programación de la secuencia de las consignas.

Illustration del método en imágenes:

Ajuste del controlador en rotación

Film1: Controlador proporcional

Kp ajustada para una respuesta oscilatoria con un tiempo de amortiguación entre 1 y 2 segundos.

Kp=0.35

Film2: Controlador PD (derivativo sobre la salida)

Kd ajustado para no obtener oscilación

Kd= 2

Las constantes fueron optimizadas para los controladores angular y lineal, con las consignas trapezoidales.

Valores optimizados:

constantes en el controlador angular:

Kp=0.5

Kd=3

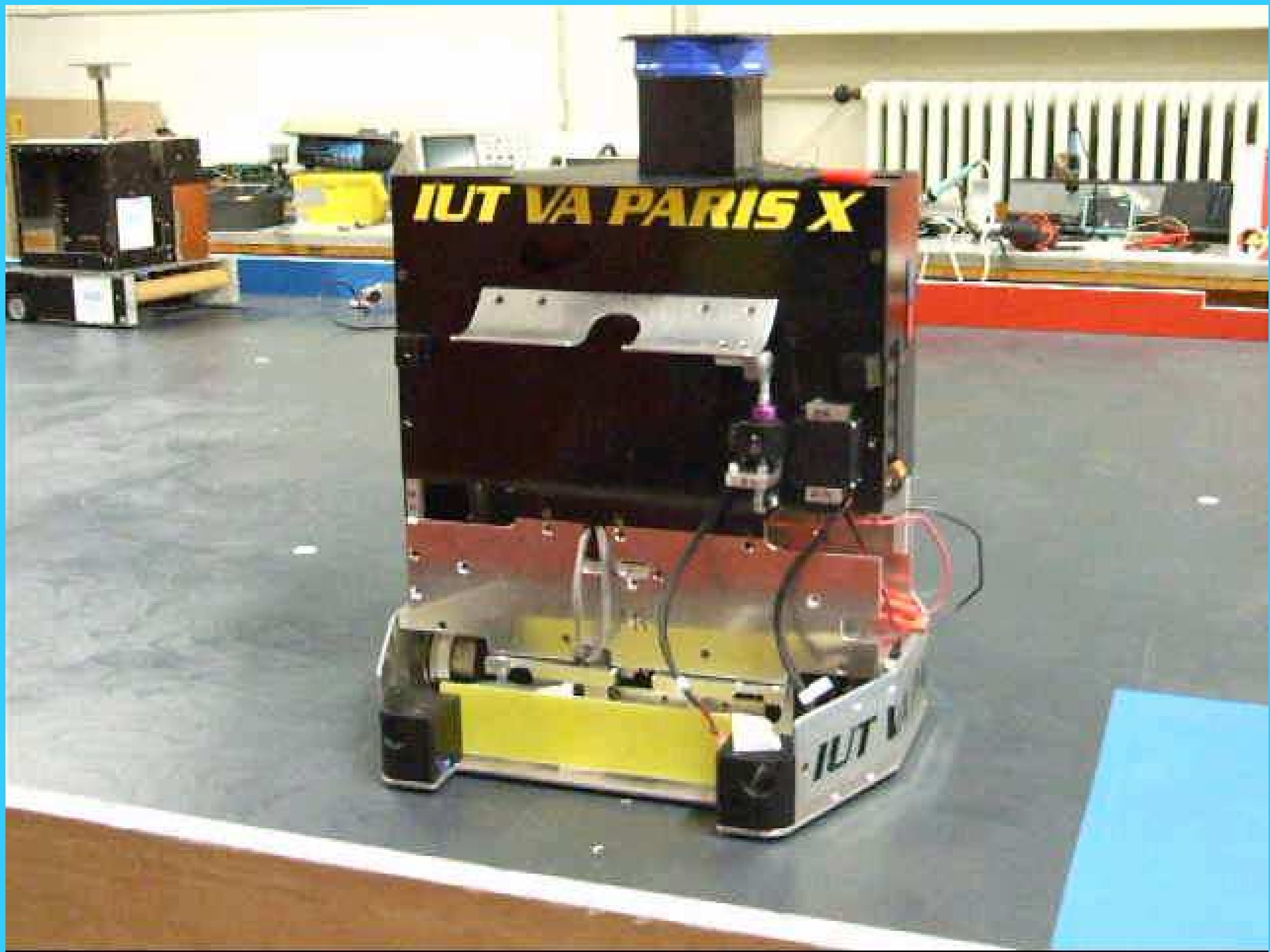
constantes en el controlador lineal:

Kp=0.7

Kd=5.2

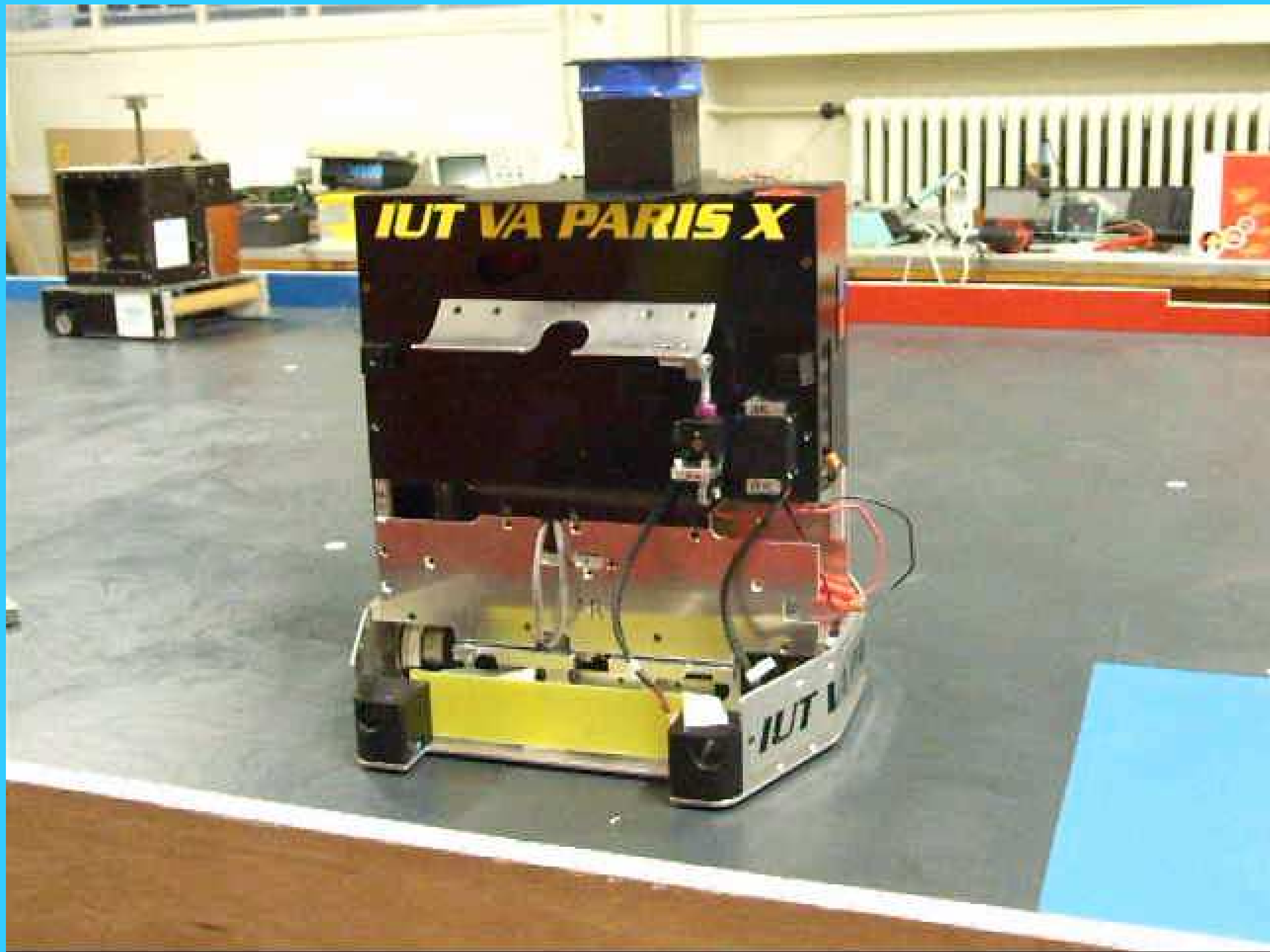
Film3: Avanza, gira 360 grados y retrocede a velocidad y aceleración máximas.

Solo está activado el controlador angular
Corrección proporcional sin término derivativo. (Kp = 0,35)
Ganancia proporcional ajustado límite servo estabilidad



rcva_10xp_proportionnel.wmv(35,720p_HQ).mp4

Solo está activado el controlador angular
Controlador porporcional y derivativo (Kp=0.35;   Kd=2)
El término derivativo está optimizado para no oscilar.



rcva_10xp_derive.wmv(480p_H.264-AAC).flv

Ganancias optimizadas: (velocidad de 1.3m/s; aceleración de 0.5g; robot simétrico)

Avanza 1 metro

Gira 360 grados

Retrocede 1 metro.

rcva_10xp_muscle2.wmv(35,720p_HQ).mp4

Nos vemos en La Ferté
Y buena suerte