

## Apéndice A

# Demostraciones y desarrollos

### A.1. Centro de masas de un robot ápodo

Partiendo de la ecuación ?? y sustituyendo en ella el valor de los vectores de posición por los calculados en ?? se llega a:

$$\overrightarrow{r} = \frac{1}{4M} \sum_{i=1}^M (\overrightarrow{I_i} + 2\overrightarrow{r_i} + \overrightarrow{D_i})$$

Esta expresión hay que dejarla sólo en función de los vectores de posición  $\overrightarrow{r_i}$  ( $i$  entre 0 y  $M+1$ ).

La conexión entre los módulos es tal que la parte derecha del módulo  $i$  se conecta con la parte izquierda del módulo siguiente  $i+1$ . Por tanto, (en el modelo alámbrico)  $\overrightarrow{D_i} = \overrightarrow{I_{i+1}}$  para  $i$  entre 1 y  $M-1$ . Si de la ecuación anterior se saca del sumatorio el sumando  $M$ :

$$\overrightarrow{r} = \frac{1}{4M} \left( \sum_{i=1}^{M-1} (\overrightarrow{I_i} + 2\overrightarrow{r_i} + \overrightarrow{D_i}) + \overrightarrow{I_M} + 2\overrightarrow{r_M} + \overrightarrow{D_M} \right)$$

Sustituyendo  $\overrightarrow{D_i}$  por  $\overrightarrow{I_{i+1}}$  y usando la definición de  $\overrightarrow{D_M} = \overrightarrow{r_{M+1}}$  queda:

$$\overrightarrow{r} = \frac{1}{4M} \left( \sum_{i=1}^{M-1} (\overrightarrow{I_i} + 2\overrightarrow{r_i} + \overrightarrow{I_{i+1}}) + \overrightarrow{I_M} + 2\overrightarrow{r_M} + \overrightarrow{r_{M+1}} \right)$$

Sacando los términos  $\overrightarrow{I_1}$ ,  $2\overrightarrow{r_1}$  e  $\overrightarrow{I_m}$  del sumatorio, la expresión se puede reordenar así:

$$\vec{r} = \frac{1}{4M} \left( \vec{I}_1 + 2\vec{r}_1 + \sum_{i=2}^{M-1} (2\vec{I}_i + 2\vec{r}_i) + \vec{I}_M + \vec{I}_M + 2\vec{r}_M + \vec{r}_{M+1} \right)$$

Operando y aplicando la definición  $\vec{I}_1 = \vec{r}_0$ :

$$\vec{r}_{cm_i} = \frac{1}{4M} \left( \vec{r}_0 + 2\vec{r}_1 + \sum_{i=2}^{M-1} (2\vec{I}_i + 2\vec{r}_i) + 2\vec{I}_M + 2\vec{r}_M + \vec{r}_{M+1} \right)$$

El valor del vector de posición del extremo izquierdo  $\vec{I}_i$  se puede poner en función de los vectores de posición del módulo  $i-1$  e  $i$ :

$$\vec{I}_i = \frac{\vec{r}_{i-1} + \vec{r}_i}{2}, i \in [2, M]$$

Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$\vec{r} = \frac{1}{4M} \left( \vec{r}_0 + 2\vec{r}_1 + \sum_{i=2}^{M-1} (\vec{r}_{i-1} + 3\vec{r}_i) + \vec{r}_{M-1} + 3\vec{r}_M + \vec{r}_{M+1} \right)$$

Sacando del sumatorio el término  $\vec{r}_1$  e introduciendo  $\vec{r}_{M-1}$  se llega a la expresión final:

$$\vec{r} = \frac{1}{4M} \left( \vec{r}_0 + 3\vec{r}_1 + 4 \sum_{i=2}^{M-1} \vec{r}_i + 3\vec{r}_M + \vec{r}_{M+1} \right)$$

c.q.d.

## A.2. Segmentos de apoyo de la configuración PP

### A.2.1. Segmento de apoyo 1

Partimos de la expresión:

$$Sa_1 = z_0 + z_1 = Le^{j\varphi_0} \left( \frac{1}{2} + e^{j\varphi_1} \right)$$

Cálculo del módulo:

$$\|Sa_1\| = L \left\| \frac{1}{2} + e^{j\varphi_1} \right\|$$

Utilizando la propiedad de que  $\|z\|^2 = z \cdot \bar{z}$ , tenemos que:

$$\left\| \frac{1}{2} + e^{j\varphi_1} \right\|^2 = \left( \frac{1}{2} + e^{j\varphi_1} \right) \left( \frac{1}{2} + e^{-j\varphi_1} \right) = \frac{1}{4} + \frac{e^{-j\varphi_1}}{2} + \frac{e^{j\varphi_1}}{2} + 1 = \frac{5}{4} + \cos(\varphi_1)$$

La expresión final es:

$$\|Sa_1\| = L \sqrt{\frac{5}{4} + \cos(\varphi_1)}$$

Cálculo del argumento:

$$\operatorname{Arg}(Sa_1) = \varphi_0 + \operatorname{Arg}\left(\frac{1}{2} + e^{j\varphi_1}\right)$$

y sabiendo que el argumento es el arctangente de la parte imaginaria entre la real:

$$\operatorname{Arg}\left(\frac{1}{2} + e^{j\varphi_1}\right) = \arctan\left(\frac{\sin(\varphi_1)}{\frac{1}{2} + \cos(\varphi_1)}\right)$$

Queda que:

$$\operatorname{Arg}(Sa_1) = \varphi_0 + \arctan\left(\frac{\sin(\varphi_1)}{\frac{1}{2} + \cos(\varphi_1)}\right)$$

### A.2.2. Cálculo del segmento de apoyo 2

$$Sa_2 = z_0 + z_1 + z_2 = Le^{j\varphi_0} \left( \frac{1}{2} + e^{j\varphi_1} + \frac{1}{2} e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)} \right)$$

El módulo se calcula así:

$$\|Sa_2\| = L \left\| \left( \frac{1}{2} + e^{j\varphi_1} + \frac{1}{2} e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)} \right) \right\|$$

y desarrollando el módulo de la parte derecha utilizando la propiedad  $\|z\|^2 = z \cdot \bar{z}$ ,

$$= \left( \frac{1}{2} + e^{j\varphi_1} + \frac{1}{2} e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)} \right) \left( \overline{\frac{1}{2} + e^{j\varphi_1} + \frac{1}{2} e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)}} \right) =$$

$$= \left( \frac{1}{2} + e^{j\varphi_1} + \frac{1}{2} e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)} \right) \left( \frac{1}{2} + e^{-j\varphi_1} + \frac{1}{2} e^{-j(\varphi_1 + \varphi_2)} \right) =$$

$$= \frac{1}{4} + \frac{1}{2} e^{-j\varphi_1} + \frac{1}{4} e^{-j(\varphi_1 + \varphi_2)} + \frac{1}{2} e^{j\varphi_1} + 1 + \frac{1}{2} e^{-j\varphi_2} + \frac{1}{4} e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)} + \frac{1}{2} e^{j\varphi_2} + \frac{1}{4} =$$

$$= \frac{3}{2} + \cos(\varphi_1) + \cos(\varphi_2) + \frac{1}{2} \cos(\varphi_1 + \varphi_2)$$

Por tanto, la expresión final es:

$$\|Sa_2\| = L \sqrt{\frac{3}{2} + \cos(\varphi_1) + \cos(\varphi_2) + \frac{1}{2} \cos(\varphi_1 + \varphi_2)}$$

Para el cálculo del argumento:

$$\operatorname{Arg}(Sa_2) = \varphi_0 + \operatorname{Arg} \left( \frac{1}{2} + e^{j\varphi_1} + \frac{1}{2} e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)} \right)$$

Y calculando el valor del segundo término como el arcotangente de la parte imaginaria entre la real queda:

$$\operatorname{Arg}(Sa_2) = \varphi_0 + \arctan \left( \frac{\sin \varphi_1 + \frac{1}{2} \sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{\frac{1}{2} + \cos \varphi_1 + \frac{1}{2} \cos(\varphi_1 + \varphi_2)} \right)$$

### A.3. Fase de transición $\phi_{12}$ de la configuración PP

Partimos de la ecuación:

$$\varphi_0^1 + \varphi_1 + \varphi_2 = 0$$

Sustituyendo en la ecuación los valores de los ángulos de doblaje para  $\phi = \phi_{12}$  queda:

$$\varphi_0^1(\phi_{12}) + A \sin \phi_{12} + A \sin(\phi_{12} + \Delta\Phi) = 0 \quad (\text{A.1})$$

Si se sustituye en la expresión anterior  $\varphi_0^1(\phi_{12})$  por su expresión dada en ?? no es trivial despejar  $\phi_{12}$ . Por ello adoptamos un enfoque diferente. Si  $\varphi_0^1(\phi_{12})$  se desarrolla en serie de Fourier y se aproxima por el primer armónico se obtiene que:

$$\varphi_0^1(\phi_{12}) = -A_0 \sin \phi_{12}$$

donde el coeficiente  $A_0$  viene dado por:

$$A_0 = \arctan \left( \frac{\sin A}{\frac{1}{2} + \cos A} \right)$$

La ecuación A.1 queda:

$$-A_0 \sin \phi_{12} + A \sin \phi_{12} + A \sin(\phi_{12} + \Delta\Phi) = 0$$

Agrupando términos:

$$(A - \alpha) \sin \phi_{12} + A \sin(\phi_{12} + \Delta\Phi) = 0$$

Esta expresión se puede poner de la forma:

$$B \sin(\phi_{12} + C) = 0 \quad (\text{A.2})$$

donde las constantes B y C tienen los valores:

$$B = \sqrt{(A - A_0)^2 + A^2 + 2(A - A_0)A \cos \Delta\Phi}$$

$$C = \arctan \left( \frac{\sin \Delta\Phi}{\left( 1 - \frac{A_0}{A} \right) + \cos \Delta\Phi} \right)$$

Para que se cumpla la ecuación A.2, el término  $\Phi_{12} + C$  tiene que ser cero lo que nos permite obtener el valor final para  $\Phi_{12}$ :

$$\Phi_{12} = -\arctan \left( \frac{\sin \Delta\Phi}{\left( 1 - \frac{A_0}{A} \right) + \cos \Delta\Phi} \right)$$

## A.4. Ángulo de rotación de la configuración PYP

### A.4.1. Etapa 1

Calcularemos el ángulo de rotación  $\theta_1$  de la etapa 1 del movimiento de rodar de la configuración PYP.

Partimos de la definición de las siguientes transformaciones homogéneas.

$$H_0^1 = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, H_1^2 = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, H_2^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & L \\ 0 & \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Obtenemos la matriz  $H_1^3$ :

$$H_1^3 = H_1^2 H_2^3 = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \cos \theta_3 & \sin \theta_2 \sin \theta_3 & -L \sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \cos \theta_3 & -\cos \theta_2 \sin \theta_3 & L \cos \theta_2 \\ 0 & \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

El vector de posición del extremo derecho es  $\vec{r}_3^4 = \frac{L}{2} \hat{y}_3$ .

Referido al sistema R0 es:

$$\vec{r}_4 = H_0^1 H_1^2 H_2^3 \vec{r}_3^4 = H_0^1 H_1^3 \vec{r}_3^4$$

Para simplificara los cálculos lo haremos por partes. Primero calculamos:

$$\vec{r}_1^4 = H_1^3 \vec{r}_3^4 = H_1^3 \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{L}{2} \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{L}{2} \sin \theta_2 \cos \theta_3 - L \sin \theta_2 \\ \frac{L}{2} \cos \theta_2 \cos \theta_3 + L \cos \theta_2 \\ \frac{L}{2} \sin \theta_3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix}$$

Las componentes de  $\vec{r}_1^4$  las denotamos por a,b,c y d. Por otro lado calculamos  $\vec{r}_4$ :

$$\vec{r}_4 = H_0^1 \vec{r}_1^4 = \begin{pmatrix} a \cos \theta_1 - c \sin \theta_1 \\ b \\ -a \sin \theta_1 + c \cos \theta_1 \\ d \end{pmatrix}$$

Imponemos la restricción  $\vec{r}_4 \cdot \hat{z}_0 = 0$ , lo que nos da la expresión:

$$-a \sin \theta_1 + c \cos \theta_1 = 0$$

Despejando  $\theta_1$  tenemos:

$$\tan \theta_1 = \frac{c}{a}$$

Sustituyendo los valores de c y a por sus correspondientes valores previamente calculados:

$$\tan \theta_1 = \frac{\frac{L}{2} \sin \theta_3}{-\frac{L}{2} \sin \theta_2 \cos \theta_3 - L \sin \theta_2} = -\frac{\sin \theta_3}{(2 + \cos \theta_3) \sin \theta_2}$$

Obtenemos la expresión para  $\theta_1$  en función de  $\theta_2$  y  $\theta_3$ .

### A.4.2. Etapa 2

El procedimiento es similar al del apartado A.4.1, pero al tratarse de la etapa 2 hay que añadir la matriz  $H_{-90}$ :

$$H_{-90} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

El segmento derecho, referido al sistema de coordenadas R3 es:  $\vec{d}_3^4 = \frac{L}{2}\hat{y}_3$ .

Su expresión referida a R0 es:

$$\vec{d}_4 = H_{-90}H_0^1H_1^2H_2^3\vec{d}_3^4 = H_{-90}H_0^1H_1^3\vec{d}_3^4$$

Para simplificara los cálculos lo faremos por partes. Primero calculamos:

$$\vec{d}_1^4 = H_1^3\vec{d}_3^4 = H_1^3 \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{L}{2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{L}{2}\sin\theta_2\cos\theta_3 \\ \frac{L}{2}\cos\theta_2\cos\theta_3 \\ \frac{L}{2}\sin\theta_3 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ 0 \end{pmatrix}$$

Las componentes de  $\vec{d}_1^4$  las denotamos por a,b y c. Por otro lado calculamos  $\vec{d}_4$ :

$$\vec{d}_4 = H_{-90}H_0^1\vec{r}_1^4 = \begin{pmatrix} a\sin\theta_1 - c\cos\theta_1 \\ b \\ a\cos\theta_1 + c\sin\theta_1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Imponemos la restricción  $\vec{d}_4 \cdot \hat{z}_0 = 0$ , lo que nos da la expresión:

$$a\cos\theta_1 + c\sin\theta_1 = 0$$

Despejando  $\theta_1$  tenemos:

$$\tan \theta_1 = -\frac{a}{c}$$

Sustituyendo los valores de  $c$  y  $a$  por sus correspondientes valores previamente calculados:

$$\tan \theta_1 = -\frac{\frac{L}{2} \sin \theta_2 \cos \theta_3}{\frac{L}{2} \sin \theta_3} = -\frac{\sin \theta_2}{\tan \theta_3}$$

Obtenemos la expresión para  $\theta_1$  en función de  $\theta_2$  y  $\theta_3$ .



## Apéndice B

# Algoritmos genéticos

### B.1. Descripción

Para las búsquedas de soluciones mediante algoritmos genéticos se ha empleado el paquete de software PGApack<sup>1</sup>, con las opciones por defecto. En la tabla B.1 se resumen los parámetros empleados.

Los individuos se representan mediante cadenas de números enteros, ordenados de la forma:  $A_v, A_h, \Delta\Phi_v, \Delta\Phi_h$  y  $\Delta\Phi_{vh}$ , con las restricciones:  $A_v, A_h \in [0, 90]$  y  $\Delta\Phi_v, \Delta\Phi_h, \Delta\Phi_{vh} \in [-180, 180]$ .

Las funciones de evaluación utilizadas son el paso a lo largo del eje x ( $\Delta x$ ), del eje y ( $\Delta y$ ), ángulo de rotación alrededor del eje z (*yaw*) y ángulo de inclinación (*roll*). Para su implementación se ha usado el simulador físico ODE (Open Dynamics Engine). Se esperan dos ciclos para que el robot alcance el régimen estacionario y se calcula el paso (lineal o angular) en el siguiente ciclo. La solución buscada es aquella que maximice el paso.

<sup>1</sup>[http://www-fp.mcs.anl.gov/CCST/research/reports\\_pre1998/comp\\_bio/stalk/pgapack.html](http://www-fp.mcs.anl.gov/CCST/research/reports_pre1998/comp_bio/stalk/pgapack.html)

Tamaño población	100
Número de generaciones	100
Tipos de datos:	Cadenas de enteros (PGA_DATATYPE_INTEGER)
Selección:	Por torneo. Probabilidad: 0.6
Cruzamiento:	de dos puntos
Reemplazo población:	SSGA. Se reemplaza el 10 % de individuos
Mutación:	Probabilidad: 0.001

Cuadro B.1: Parámetros empleados en los algoritmos genéticos

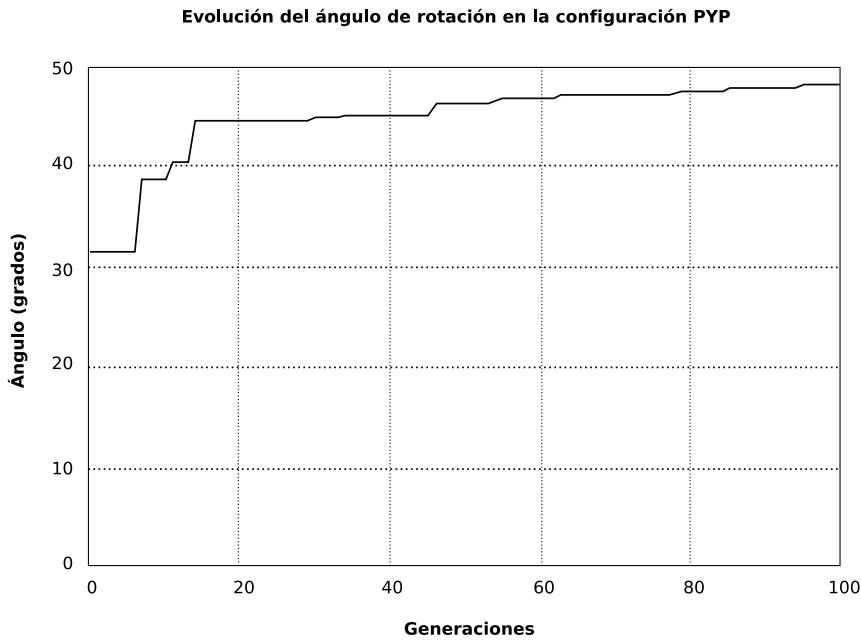


Figura B.1: Evolución del ángulo de rotación de la configuración mínima PYP

## B.2. Ejemplo

El funcionamiento de la aplicación desarrollada se ilustra con un ejemplo. Se quieren obtener las soluciones para que la configuración mínima PYP realiza una rotación del mayor ángulo posible por ciclo. Para ello se ejecuta:

```
./GA_PYn 2 1 YAW 3 100 100
```

En la máquina donde se han realizado las pruebas, un portátil Dell Latitude D810, con 512MB de RAM y procesador Intel Pentium a 1.73GHz, tarda aproximadamente 13 minutos en finalizar.

Los resultados se devuelven en dos ficheros. Uno de texto que contiene todos los individuos de todas las generaciones. El otro es un *script* en Octave que dibuja la evolución del paso con las generaciones. El gráfico correspondiente a este ejemplo se muestra en la figura B.1. En la población inicial, generada aleatoriamente ha aparecido al menos un individuo que rota unos 30 grados. Esto no significa que realice un buen movimiento, sino que al cabo de un ciclo su orientación ha variado en 30 grados, pero puede tratarse de un movimiento caótico o que además de esta rotación se realicen desplazamientos. Según avanzan las generaciones aparecen individuos que cada vez rotan más y con un movimiento mejor coordinado.

## **Apéndice C**

# **Módulos Y1**

### **C.1. Planos**

Los planos aquí mostrados no están a escala 1:1, se han reducido un 20 % para su correcta integración en este apéndice<sup>1</sup>. Los planos incluidos son los siguientes:

1. Servomecanismos Futaba 3003
2. Pieza F
3. Pieza E
4. Piezas B1 y B2
5. Pieza FE
6. Módulo montado (I)
7. Módulo montado (II)
8. 4 Módulos Y1 en conexión cabeceo-cabeceo.
9. Tornillos empleados.

---

<sup>1</sup>Toda la información está disponible en: <http://www.iearobotics.com/personal/juan/doctorado/Modulos-Y1/modulos-y1.html>

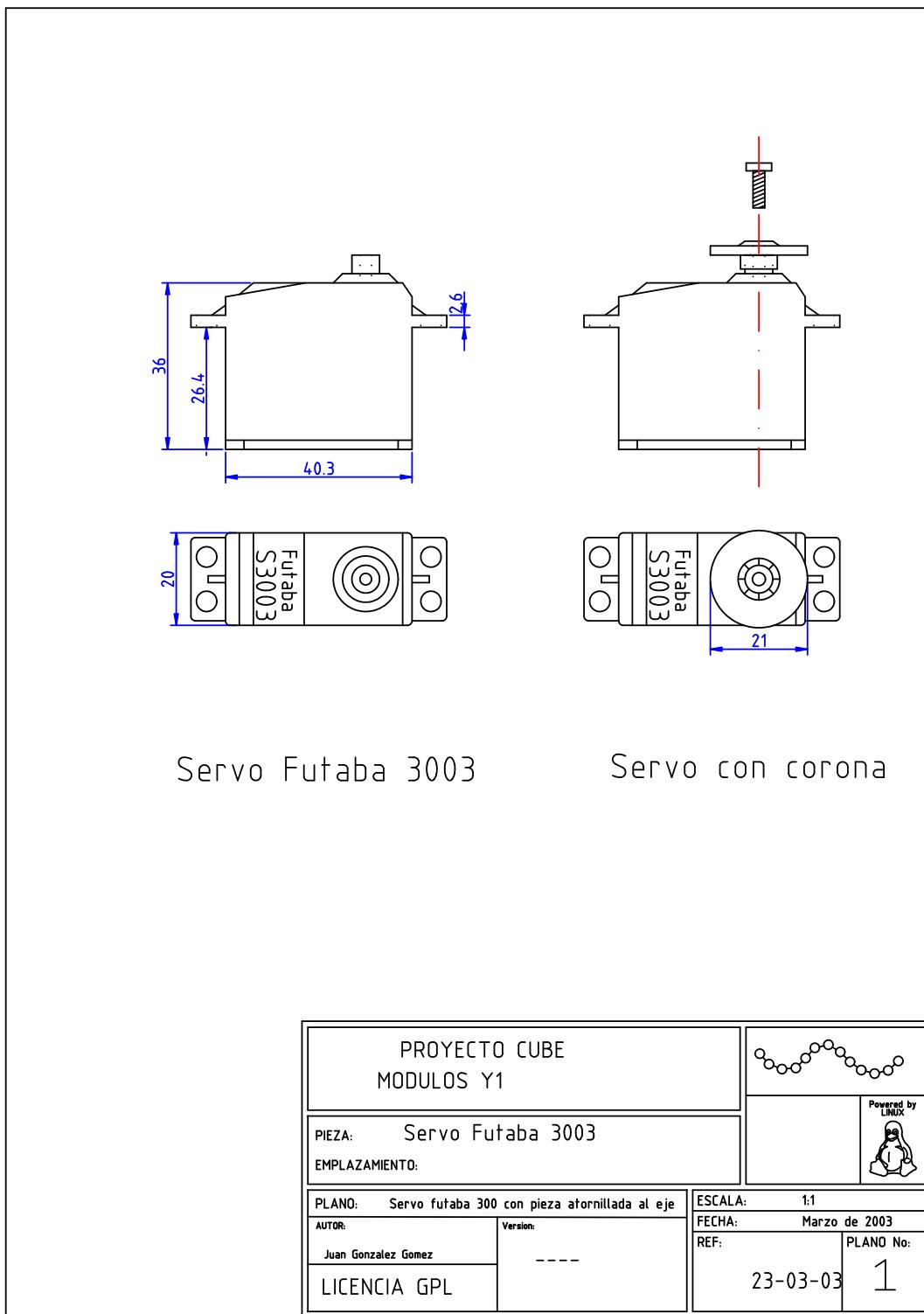


Figura C.1: Plano 1: Servomecanismo Futaba 3003

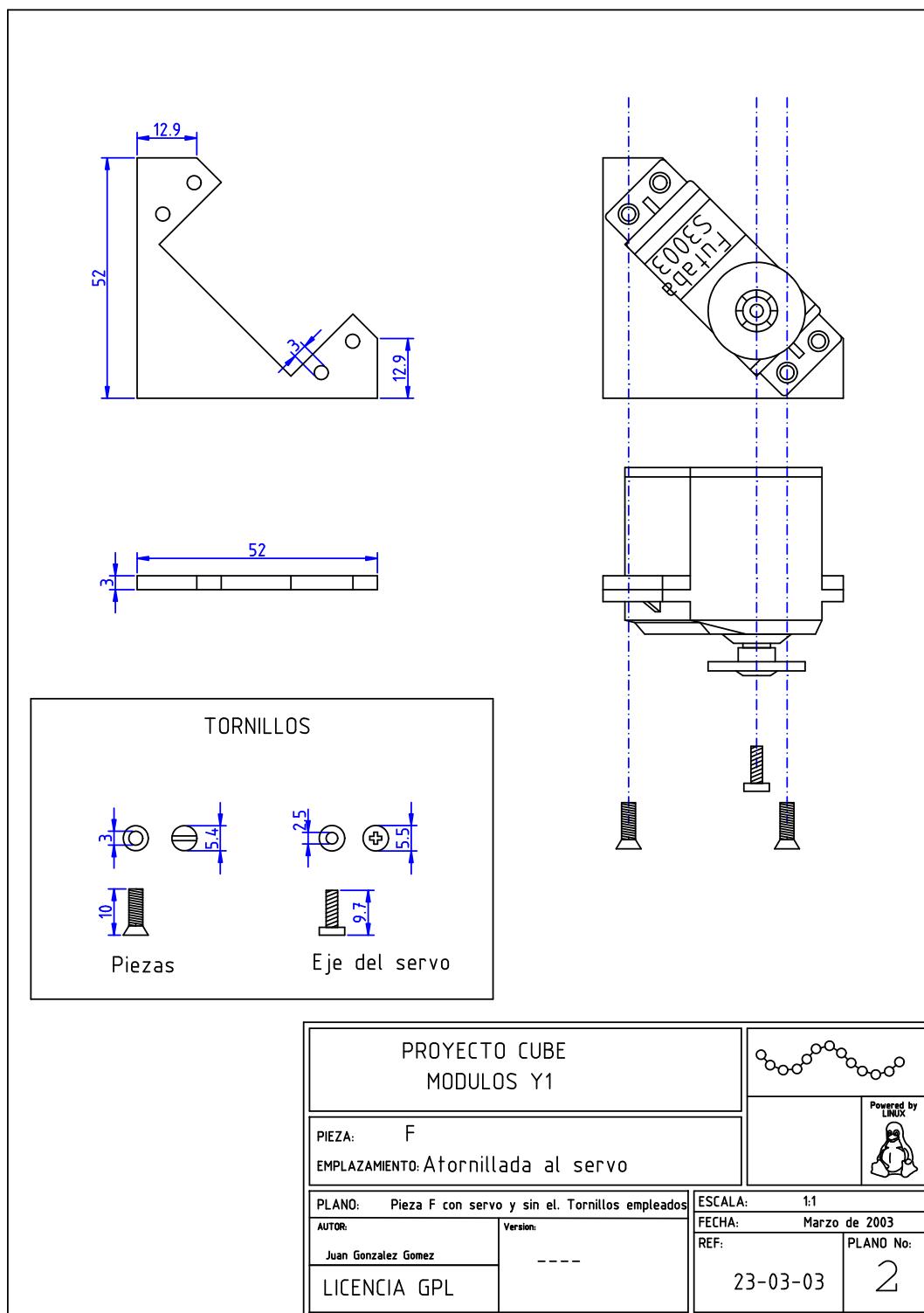


Figura C.2: Plano 2: Pieza F

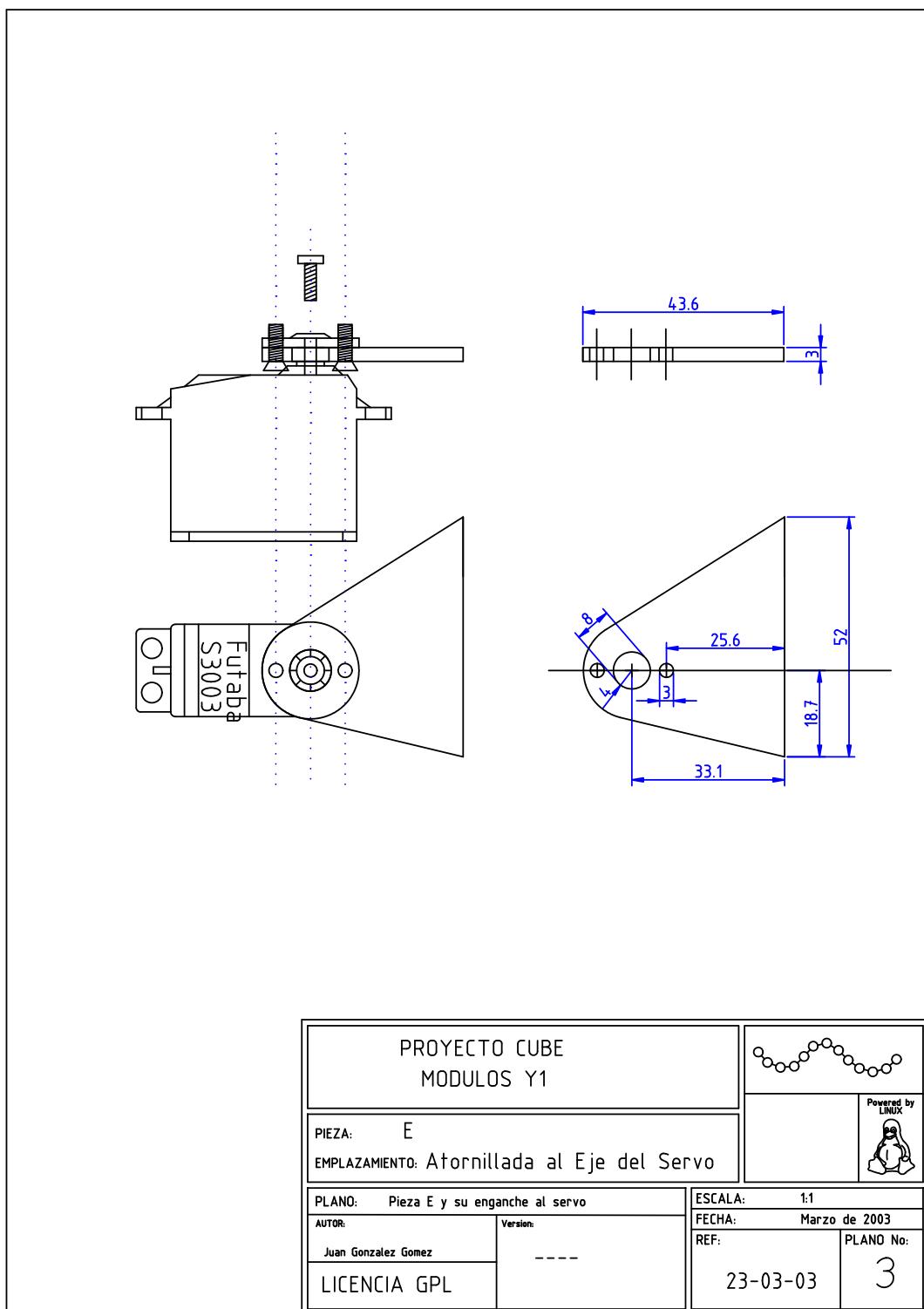


Figura C.3: Plano 3: Pieza E

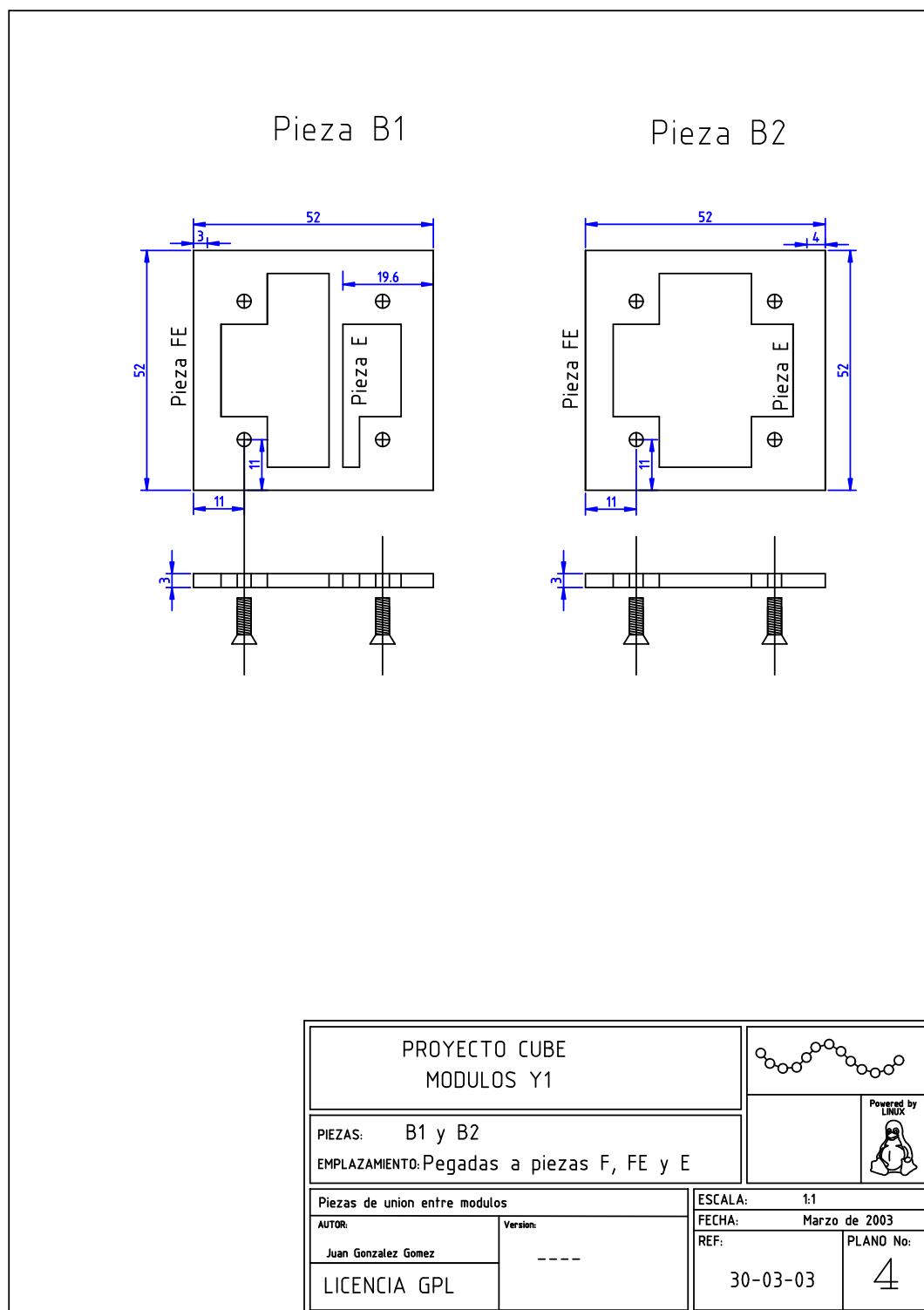


Figura C.4: Plano 4: Piezas B1 y B2

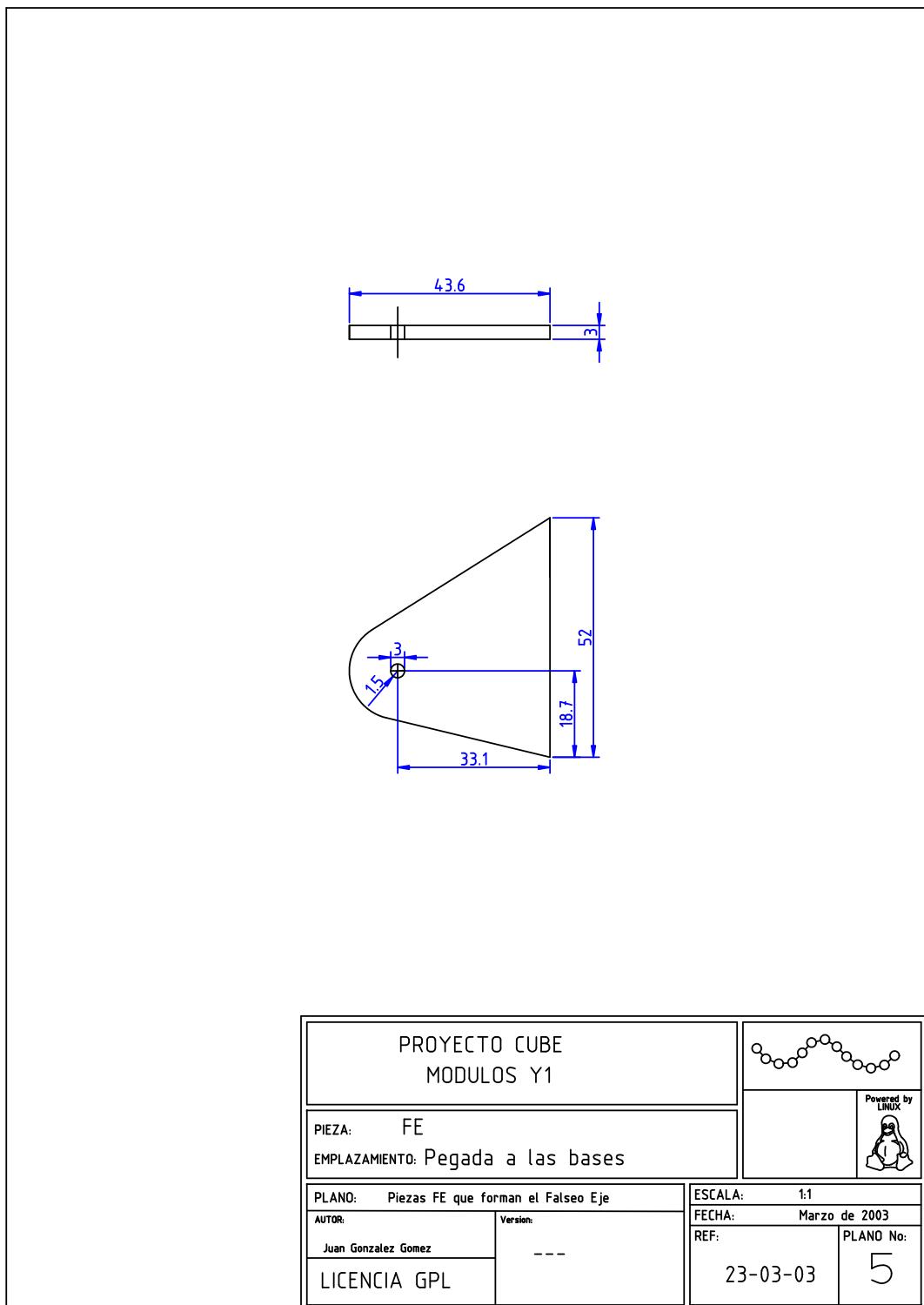


Figura C.5: Plano 5: Pieza FE

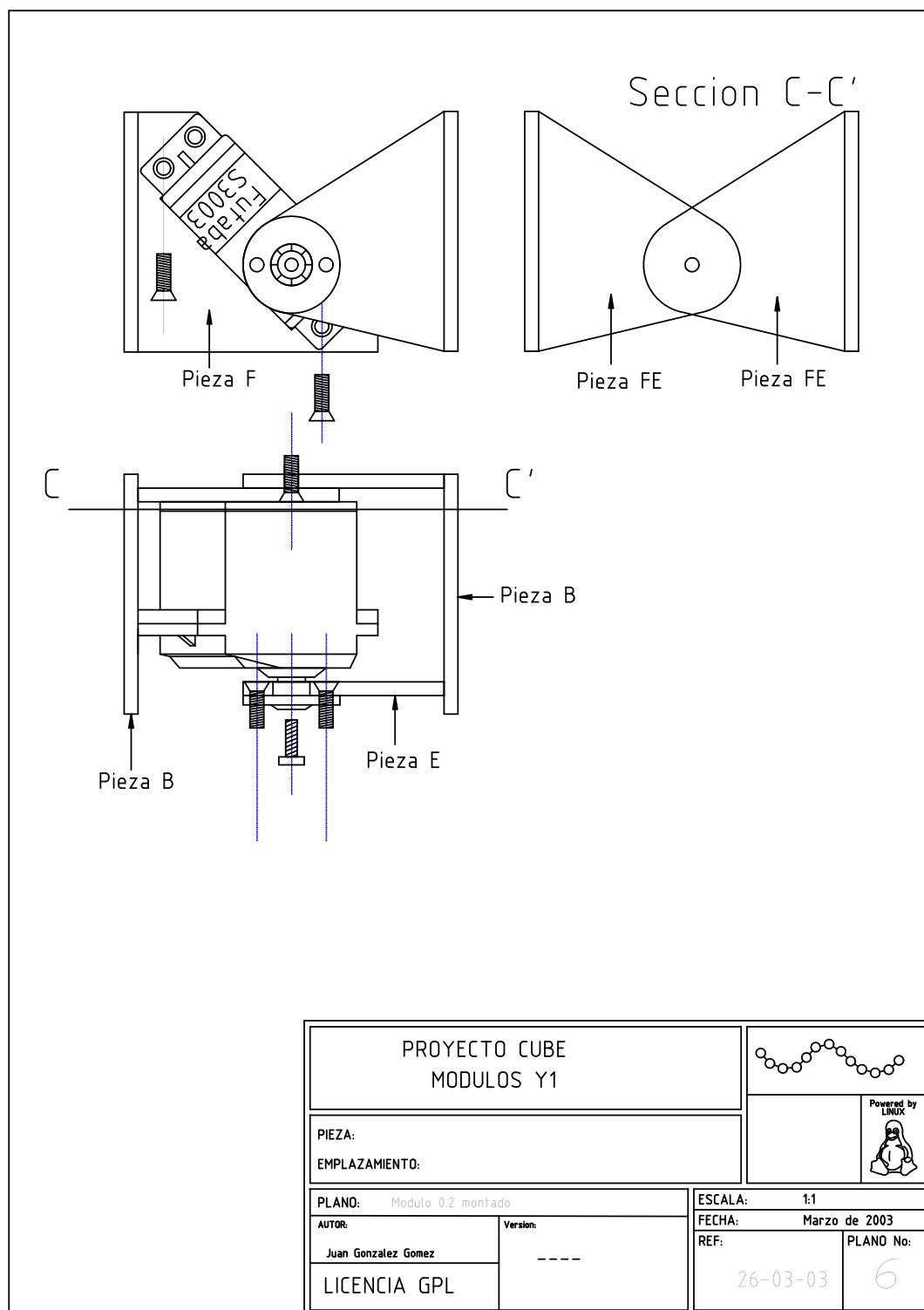


Figura C.6: Plano 6: Módulo montado (I)

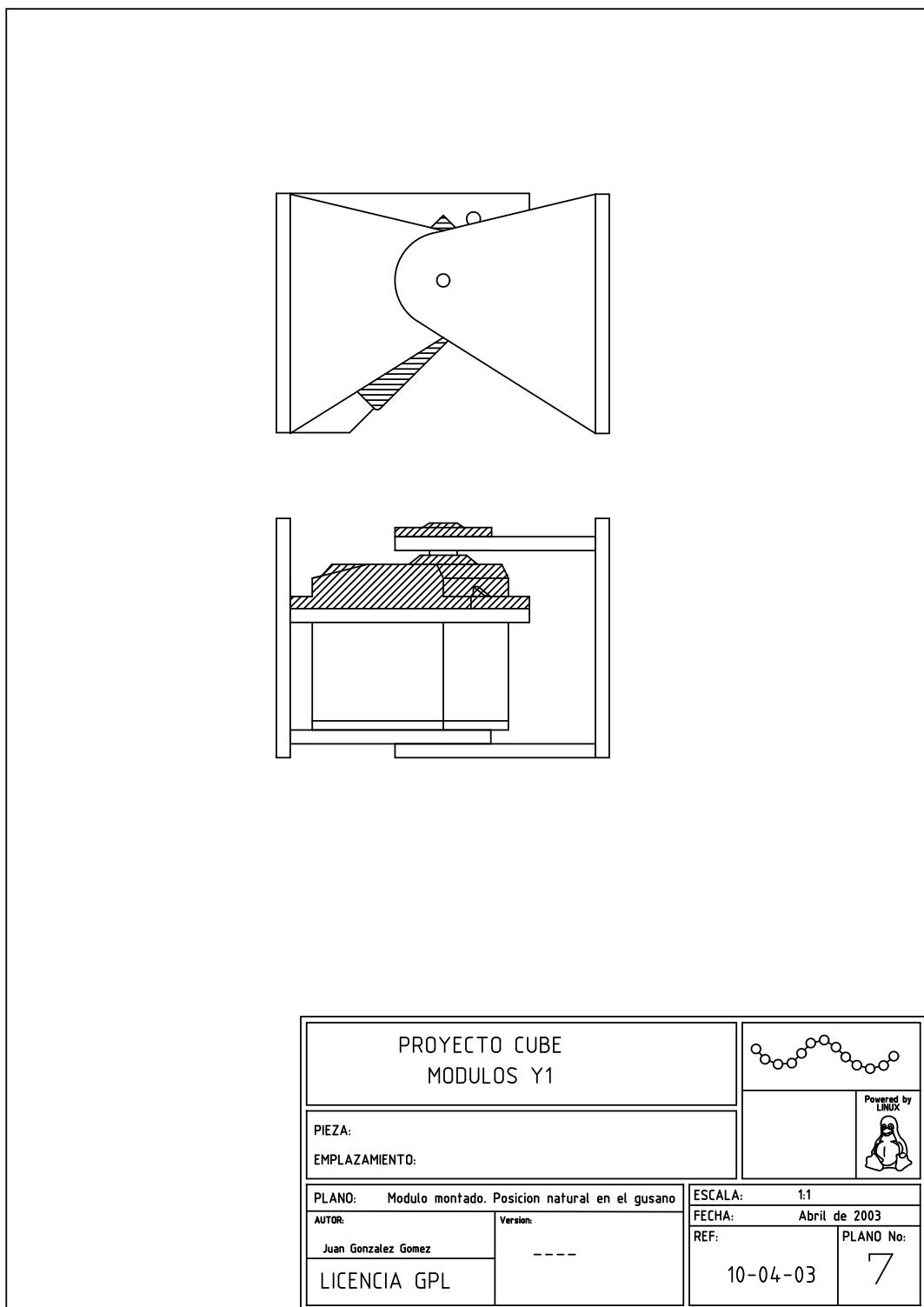


Figura C.7: Plano 7: Módulo montado (II)

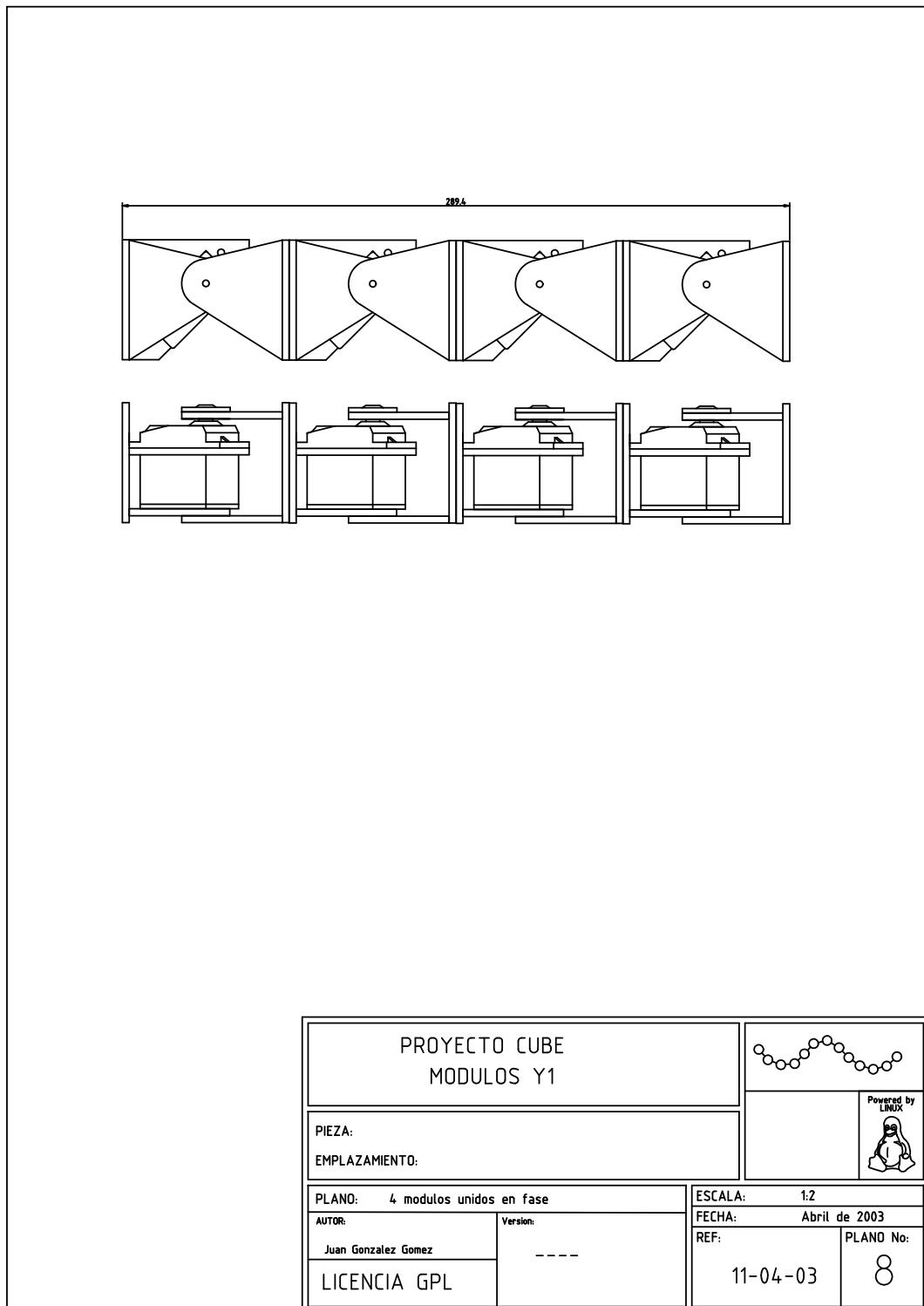


Figura C.8: Plano 8: 4 Módulos Y1 en conexión cabeceo-cabeceo.

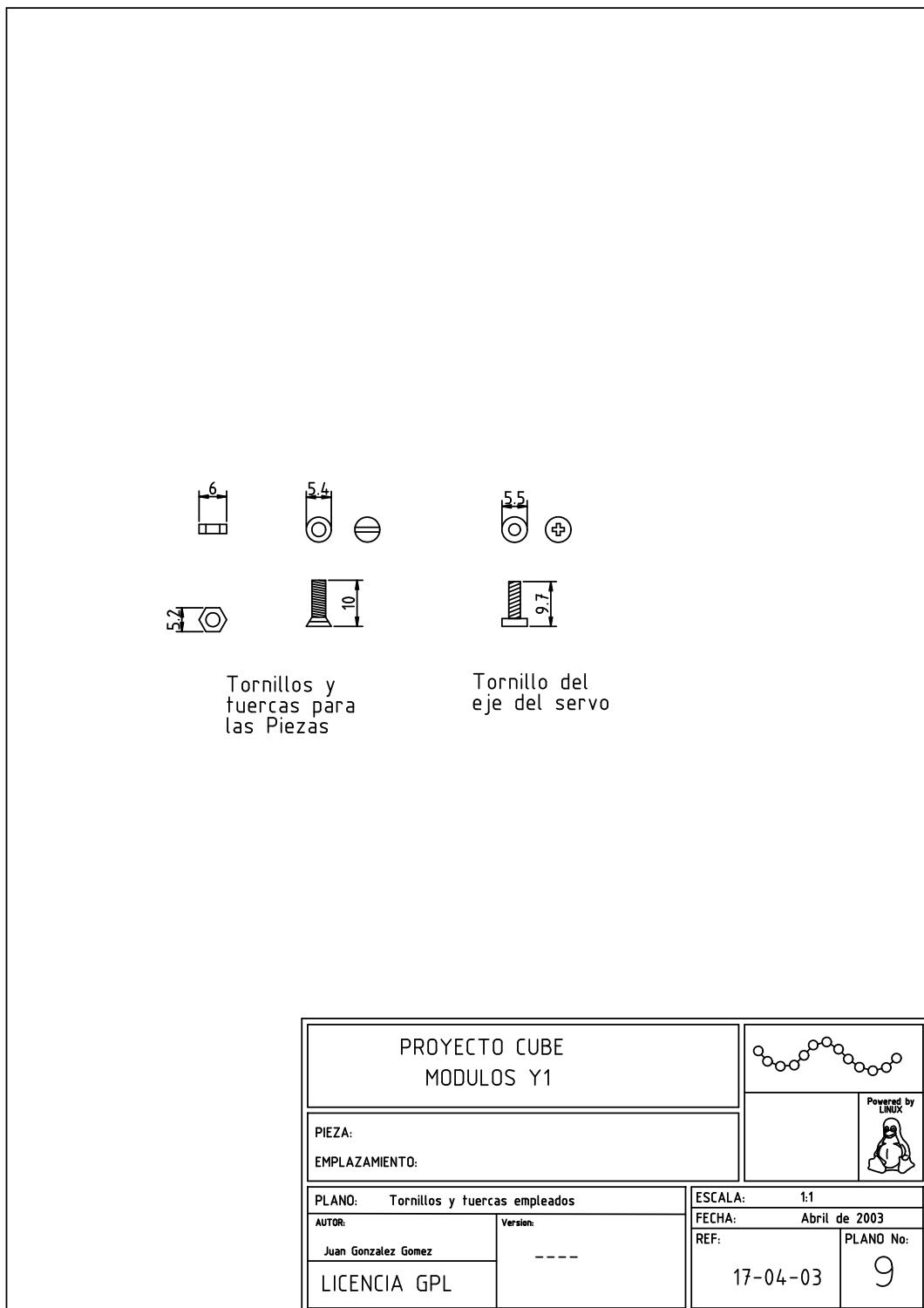


Figura C.9: Plano 9: Tornillos empleados.

## C.2. Montaje

En este apéndice se describe cómo montar los módulos Y1 a patir de las piezas básicas. Las piezas se pueden obtener de las siguientes maneras:

- Construírselas uno mismo. Para ello lo mejor es imprimir la plantilla de la piezas sobre un papel A4 transparente tipo pegatina. Pegarlo sobre una lámina del material empleado para su construcción (PVC expandido, metacrilato, etc). Cortar las piezas y hacer los taladros. Para los primeros prototipos hemos utilizado una seguta de las usadas para cortar madera.
- Dar la plantilla a una tienda en la que realicen corte de las piezas. Esta solución es la mejor construir muchos módulos.

Una vez que se dispone de todas las piezas, se puede comenzar con el montaje, resumido en los siguientes pasos (ver figura C.10):

1. Material necesario. Dos piezas FE, una E, una F, una B1 y una B2. En total 6. Un servomecánismo del tipo Futaba 3003 con una corona de  $\Phi 21\text{mm}$  y su tornillo (Incluidos con el servo). Además son necesarios 5 tonillos de  $\Phi 3\text{mm}$  y 10mm de largo y 6 tuercas para esos tornillos.
2. Las piezas B1 y F se pegan usando un pegamento especial para plásticos.
3. Una de las piezas FE se pega también a la base B1. Obsérvese que no está justo en el extremo, sino unos milímetros hacia el interior.
4. La pieza E se pega a la B2, pero no junto al extremo, sino alineada con la cara interior.
5. La otra pieza FE se pega también a la B2, pero esta sí está alineada con la cara exterior. Un tornillo se sitúa en la otra pieza FE, que hará de falso eje.
6. La corona del servo se atornilla a la pieza E.
7. El servo se atornilla la pieza F. Con esto se obtiene una de las dos partes móviles del módulo. Esta parte se denomina cuerpo del módulo. La otra parte, que se atornilla al eje del servo y al falso eje, se denomina Cabeza del módulo.
8. Finalmente se unen el cuerpo y la cabeza para obtener el módulo definitivo. Las dos tuercas se ponen en el falso eje. Antes de realizar la unión es preciso calibrar el servo. Tiene que estar en su posición central (0 grados), de manera que al terminarla, la cabeza pueda girar 90 grados en ambos sentidos.

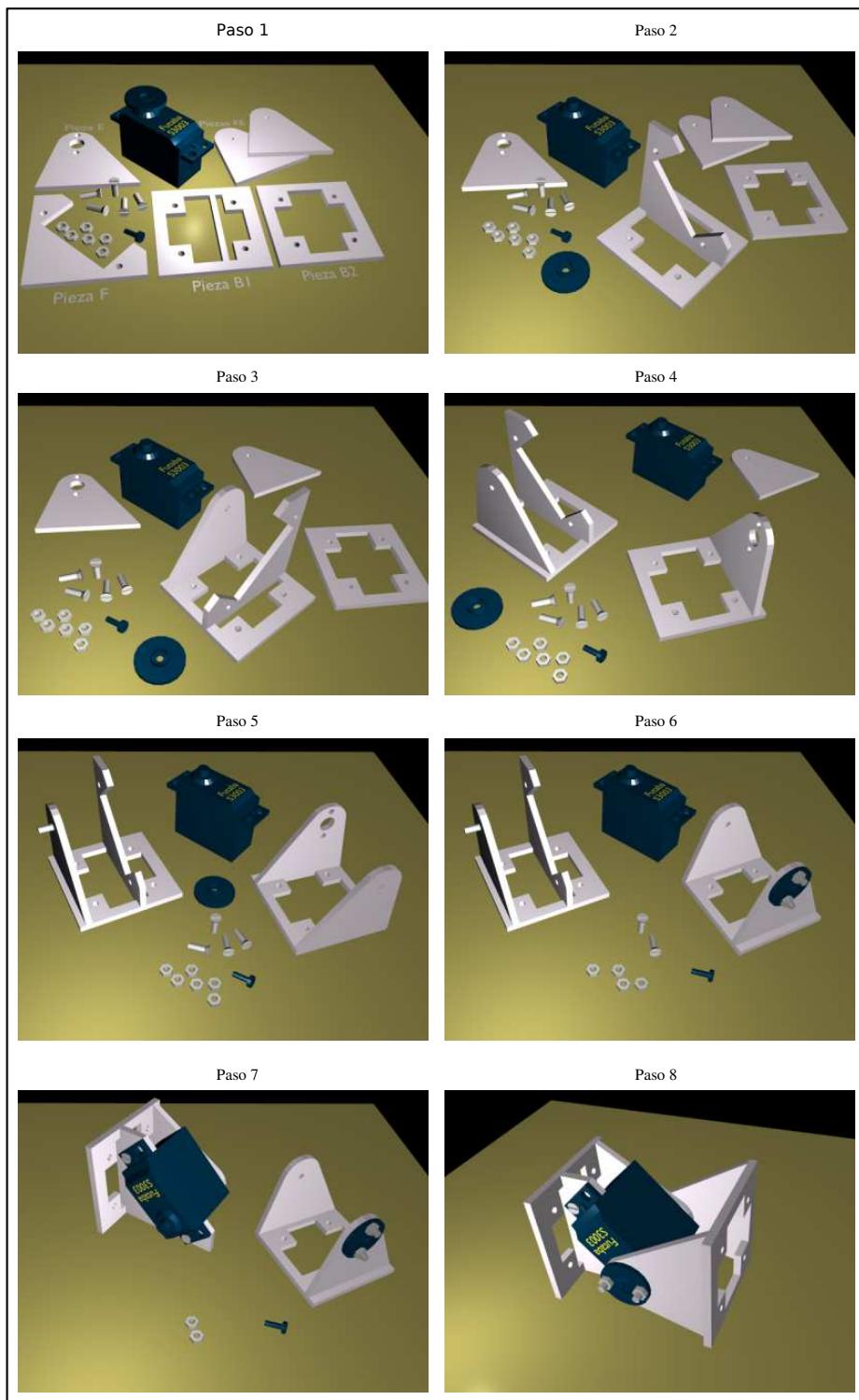


Figura C.10: Pasos para el montaje de un módulo Y1

# Apéndice D

## Simulación

### D.1. Parámetros del ODE

Para las simulaciones se ha empleado el motor físico ODE<sup>1</sup> (Open Dynamics Engine). Es una librería que realiza todos los cálculos físicos a partir de la definición de los cuerpos de estudio. En cada paso de simulación se calculan los parámetros cinemáticos y dinámicos de todos los elementos.

Los valores empleados para los parámetros del ODE se muestran en la tabla D.1.

### D.2. Simulación de los módulos Y1

Para la simulación de los servos se han seguido las recomendaciones indicadas en el manual del *ODE*. Se ha empleado un controlador de tipo proporcional, dado por la ecuación D.1, donde  $w(t)$  es la velocidad angular,  $\varphi(t)$  el ángulo de doblaje,  $p$  la posición de referencia y  $K_p$  la ganancia.

---

<sup>1</sup><http://www.ode.org/>

Gravedad	-9.81
CFM	$10^{-5}$
ERP	0.2
MaxCorrectingVel	0.1
SurfaceLayer	0.0001
Mu	0.2
Paso de simulación	0.01 seg
AutodisableFlag	1

Cuadro D.1: Valores de los parámetros de ODE empleados para las simulaciones

Parámetro	Valor	Unidades	Descripción
$E_{min}$	5	grados	Error mínimo ( $\frac{\pi}{36}$ Rad)
$L$	72	mm	Longitud del módulo
Grosor	52	mm	Anchura del módulo
Altura	52	mm	Altura del modulo
$M$	50	gr	Masa total
$P_{max}$	0.314	N.m	Par máximo del servo
$K_p$	8.6	—	Ganancia del servo (controlador P)
$W_{max}$	$\frac{13}{9}\pi$	Rad/seg	Velocidad máxima (260 grad/seg)

Cuadro D.2: Parámetros del módulo y del servo empleados en la simulación

$$w(t) = K_p[\varphi(t) - p] \quad (\text{D.1})$$

Los parámetros usados para la simulación de los módulos Y1 se muestran en la tabla D.2. La constante  $K_p$  se ha ajustado empíricamente para que el tiempo de establecimiento se aproxime al de los servos modelo Futaba 3003.

El parámetro  $E_{min}$  es el error mínimo permitido entre la posición deseada  $p$  y el ángulo de doblaje  $\varphi(t)$ . Cuando se cumpla la condición D.2

$$|p - E_{min}| < |\varphi(t)| < |p + E_{min}| \quad (\text{D.2})$$

se considera que el servo ha alcanzado la posición de referencia y por tanto se puede enviar una nueva posición. Si  $E_{min}$  es cercano a 0, el servo alcanza la posición de referencia con una velocidad pequeña. El efecto que esto tiene al reproducir una secuencia de movimiento constituida por una lista de posiciones de referencia, es que el movimiento se realiza a “saltos”. Para aumentar la fluidez se precisa de un valor de  $E_{min}$  mayor.

En la figura D.1 se ha representado la respuesta al escalón. En la parte superior se muestra la posición de referencia  $p$ , que es 0 hasta que en un cierto instante cambia a 90 grados (el escalón), junto al ángulo de salida  $\varphi(t)$ . En la parte inferior se muestra la velocidad angular. Nunca puede ser superior a la máxima permitida por el servo ( $W_{max}$ ).

Para implementar la oscilación de los servos se envían secuencias de posiciones de referencias obtenidas a partir del muestreo de una función seno. En ángulo de doblaje no describe una sinusoide perfecta sino como la mostrada en la figura D.2, donde se están usando 8 muestras.

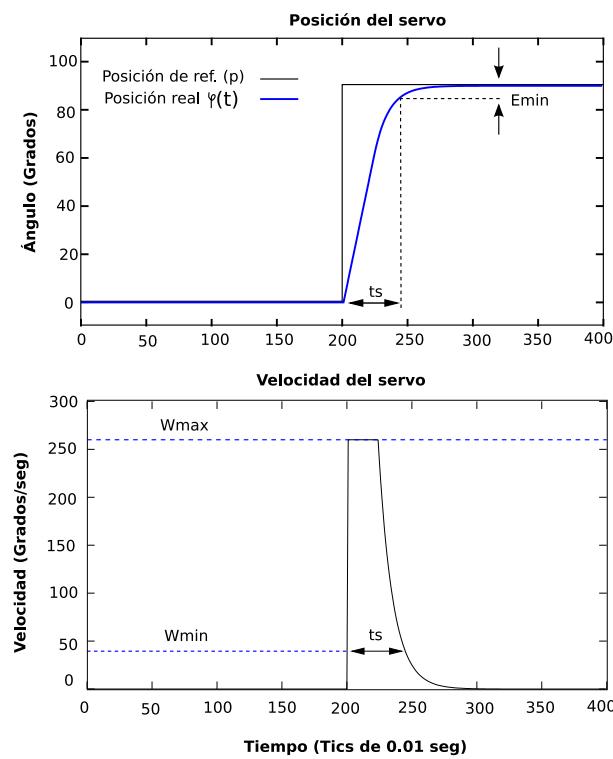


Figura D.1: Respuesta al escalón en la simulación del servo

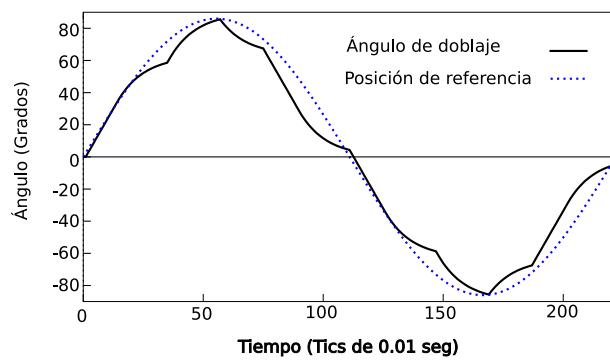


Figura D.2: Comparación entre el ángulo de doblaje real y la función sinusoidal de referencia, cuando se utilizan 8 muestras por periodo

Movimiento	Comando
<b>Grupo cabeceo-cabeceo</b>	
Línea recta. 32 Módulos.	./View './Pn 32 12 32 23 0'
Línea recta. Cube Revolution.	./View './Pn 8 85 32 90 0'
Línea recta. Minicube-I	./View './Pn 2 60 32 110 0'
<b>Grupo cabeceo-viraje</b>	
Línea recta. 32 Módulos	./View './PYn 32 32 20 0 0 0 45 0 0'
Línea recta. Hypercube	./View './PYn 8 32 45 0 0 0 135 0 0'
Línea recta. Minicube-II	./View './PYn 3 32 60 0 0 0 110 0 0'
Giro. 18 Módulos	./View './PYn 18 32 70 0 0 10 120 0 0'
Giro. Hypercube	./View './PYn 8 32 20 0 0 22 120 0 0'
Rodar. 20 Módulos	./View './PYn 20 32 10 10 0 0 0 0 90'
Rodar. Hypercube	./View './PYn 8 32 30 30 0 0 0 0 90'
Rodar. Minicube-II	./View './PYn 3 32 60 60 0 0 0 0 90'
Rotación. 32 Módulos	./View './PYn 32 32 10 40 0 0 90 45 0'
Rotación. Hypercube	./View './PYn 8 32 20 40 0 0 180 90 -45'
Rotación. Minicube-II	./View './PYn 3 32 30 40 0 0 180 0 90'
Rotación en U. 16 Módulos	./View './PYn 16 32 10 20 0 0 90 0 90'
Rotación en U. 8 Módulos	./View './PYn 8 32 10 40 0 0 180 0 90'
Desplazamiento lateral. 32 Módulos	./View './PYn 32 20 5 40 0 0 -45 -45 112'
Desplazamiento lateral. Hypercube	./View './PYn 8 32 10 40 0 0 90 90 45'
Lateral inclinado. 32 Módulos	./View './PYn 32 32 20 20 0 0 -22 -22 0'
Lateral inclinado. Hypercube	./View './PYn 8 24 40 40 0 0 -90 -90 60'
Remero. 16 Módulos	./View './PYn 16 32 2 2 0 0 0 0 90'
Remero. Hypercube	./View './PYn 8 32 7 7 0 0 0 0 90'
Remero. Minicube-II	./View './PYn 3 100 30 30 0 0 0 0 90'

Cuadro D.3: Ejemplos de utilización del simulador para la visualización del movimiento de los diferentes robots creados

### D.3. Ejemplos de utilización

El simulador desarrollado para analizar la locomoción de los robots ápodos lo forman un conjunto de utilidades invocadas desde la línea de comandos. Una de ellas es *View*, que permite la visualización del movimiento en un escenario en tres dimensiones. En la tabla D.3 se han recopilado algunos de los movimientos que pueden realizar los robots creados para los experimentos de la tesis: Cube Revolutions, Hypercube, Minicube-I y Minicube-II.

El programa *View* es genérico y permite simular cualquier robot ápodo de tipo cabeceo-cabeceo o cabeceo-viraje con cualquier número de módulos y cualquier valor para sus parámetros de los generadores. Se le pasan tres bloques de parámetros. Primero el número de módulos del robot, a continuación los valores de los parámetros Amplitud, Número de muestras, Fase y Offset para cada módulos y finalmente el tipo módulo, utilizando una P si es cabeceo y una Y si es de Viraje.

En esta tesis se han estudiado las soluciones en los espacios  $H_1$  y  $H_2$  donde todos los generadores son iguales. Para simplificar la invocación se usan los scripts *Pn* y *PYn*, para simular los robots del grupo

cabeceo-cabeceo y cabeceo-viraje respectivamente.

Por ello, para visualizar las simulaciones el comando empleado es de la forma:

`./View ./PYn M N Av Ah Ov Oh DFv DFh DFvh`

para configuraciones cabeceo-viraje o:

`./View ./Pn M A N F 0`

Para las de cabeceo-cabeceo.



# **Bibliografía**