

# **INTEGRACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN CONTROLADOR NUMÉRICO EN UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DE ALTA PRECISIÓN**

TRABAJO FINAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**Autor:** Alberto Carlos ALONSO

**Tutor:** Dr. Ing. Rogelio L. HECKER

GENERAL PICO, 8 de Agosto de 2011

---

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b> .....	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>3</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>4</b>
<b>ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO</b> .....	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 1: MESA DE POSICIONAMIENTO DE ALTA VELOCIDAD</b> .....	<b>6</b>
INTRODUCCIÓN .....	6
PROCEDIMIENTO DE DISEÑO .....	7
ESPECIFICACIONES DE DISEÑO .....	9
SELECCIÓN DE COMPONENTES PREFABRICADOS .....	10
MODELO DEL SISTEMA .....	15
<b>CAPÍTULO 2: INTEGRACIÓN DEL CONTROLADOR CNC</b> .....	<b>18</b>
INTRODUCCIÓN .....	18
SELECCIÓN DEL CONTROLADOR .....	19
CONEXIONES .....	22
MANEJO Y PROGRAMACIÓN INTERNA .....	33
<b>CAPÍTULO 3: MONTAJE DE LA ESCALA LINEAL</b> .....	<b>42</b>
INTRODUCCIÓN .....	42
SELECCIÓN .....	43
MONTAJE .....	45
CONEXIONES .....	53
<b>CAPÍTULO 4: PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA</b> .....	<b>55</b>
SOFTWARE DE CONTROL .....	55
AJUSTES DEL SISTEMA .....	56
PROGRAMACIÓN DE LAZOS DE CONTROL INTERNOS .....	61
PROGRAMACIÓN DE LAZOS DE CONTROL PERSONALIZADOS .....	67
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES</b> .....	<b>68</b>
<b>APÉNDICES</b> .....	<b>69</b>
<b>APÉNDICE A: PLANOS DE FABRICACIÓN Y FIJACIÓN</b> .....	<b>69</b>
<b>APÉNDICE B: PWIN32PRO2: PROGRAMA DEL CONTROLADOR ADV. 400</b> ....	<b>70</b>
<b>APÉNDICE C: PMACTUNINGPRO2: PROGRAMA DE SINTONIZACIÓN</b> .....	<b>80</b>
<b>APÉNDICE D: ALGORITMOS PERSONALIZADOS DE CONTROL</b> .....	<b>91</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>99</b>

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres y a mis hermanas por estar incondicionalmente brindándome apoyo y la contención para poder transitar los tiempos difíciles.

## RESUMEN

El trabajo constó de la integración de un controlador numérico a una mesa de posicionamiento XY, la cual se encontraba controlada por un sistema de arquitectura abierta, por medio de una placa adquisidora de datos. Dicha integración debía realizarse de manera tal que se pudieran utilizar alternativamente los dos sistemas de control.

Conjuntamente con esta integración del controlador se realizó la instalación de una escala lineal para medir la posición del eje de desplazamiento Y.

Una vez finalizados estos trabajos se procedió a poner en marcha el nuevo sistema de control de la mesa de posicionamiento XY y realizar los ajustes correspondientes para dejar en funcionamiento el sistema completo.

Los logros de este trabajo fueron la instalación de la escala lineal cumpliendo todos los requisitos especificados en el manual de montaje, y la integración y puesta en marcha del controlador, como también la sintonización de los lazos de control para los motores, de manera tal que los errores de seguimiento a trayectorias conocidas se mantuvieran dentro de los valores logrados con el sistema de control inicial, es decir, el de arquitectura abierta.

Finalmente se dejan dos guías de manejo para los programas utilizados en la sintonización y programación de los lazos de control, en las cuales se detallan las diferentes funciones que se utilizaron para realizar el actual trabajo.

## ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

El presente trabajo final detalla las etapas que se llevaron a cabo para lograr la integración y puesta en marcha de un controlador numérico en un sistema de posicionamiento de alta precisión. El mismo está formado por 5 capítulos los cuales se describen brevemente a continuación.

El primer capítulo corresponde al estudio del sistema existente, a fin de conocer los distintos componentes que lo conforman y las principales características de los mismos. Para ello se utilizaron los manuales y los informes que se realizaron del sistema.

Por medio del segundo capítulo se podrá conocer cómo se realizó la integración del controlador numérico al sistema de posicionamiento. Dicha integración corresponde a las conexiones del controlador numérico computarizado (CNC) y a la configuración de parámetros iniciales de funcionamiento. También se describe el manejo del panel de control del CNC y sus principales características.

El tercer capítulo involucra el montaje de la escala lineal, donde se realiza la descripción de la escala lineal y sus características más importantes. Luego se detalla el procedimiento llevado a cabo para realizar el montaje, como también las conexiones que fueron necesarias para vincular la escala lineal al controlador numérico.

El cuarto capítulo describe las características del software de control utilizado para manejar y configurar al controlador numérico. También se detallan los pasos que se llevaron a cabo para realizar la sintonización, optimización y ajuste de ganancias de los lazos de control del sistema de posicionamiento. En donde se utilizaron trayectorias típicas para analizar y mejorar el error de seguimiento.

También se presenta un quinto capítulo que contiene las conclusiones más importantes a las que se arribaron. Finalmente se presentan cuatro apéndices que contienen planos de fabricación de soportes para fijación de la escala lineal, guías de manejo del programa PWIN32PRO2 y PMACTUNINGPRO2, y un apéndice dedicado al desarrollo de algoritmos personalizados de control.

## CAPÍTULO 1: MESA DE POSICIONAMIENTO DE ALTA VELOCIDAD

### INTRODUCCIÓN

El presente capítulo contempla los distintos pasos que se llevaron a cabo para la construcción de la mesa de posicionamiento, selección de los componentes prefabricados y el modelo matemático utilizado para representarla. Los datos aquí expuestos fueron extraídos de las publicaciones [1], [2] y [3] realizadas de la mesa de posicionamiento, conjuntamente con los manuales de selección de motores [4] y controladores [5].

Considero necesario incluir toda esta información dentro del proyecto, dado que forma parte del sistema con que trabajé, y el conocimiento básico de la misma me fue necesario para iniciar el trabajo de integración y puesta en marcha de la mesa de posicionamiento y el controlador CNC.

La mesa en cruz o mesa XY es una configuración de dos ejes de desplazamiento montados perpendicularmente uno sobre otro. Cada eje de posicionamiento es una configuración de distintos elementos que permiten el desplazamiento de un carro a lo largo de un recorrido útil. Éste se encuentra formado por un motor eléctrico acoplado a un sistema tornillo-tuerca, un carro solidario a dicha tuerca, un sistema de guías para el carro y soportes para sostener el tornillo en sus extremos, tal como se muestra en la FIGURA 1-1.

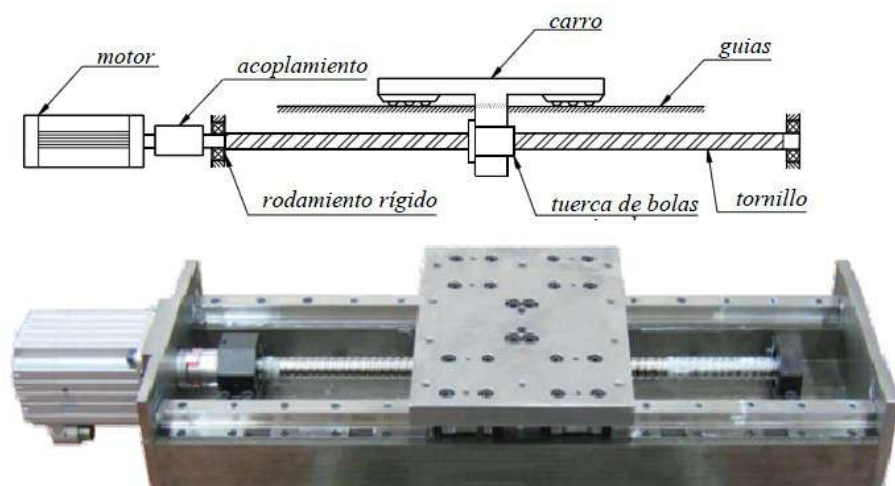


FIGURA 1-1: Esquema y eje real de posicionamiento

Todo el conjunto está montado sobre una base especialmente diseñada para soportar tanto los esfuerzos estáticos como los dinámicos. En la FIGURA 1-2 puede verse la mesa de posicionamiento modelada en 3D, como también la mesa real.

Desde el punto de vista estructural, los grandes esfuerzos dinámicos, producto de las altas aceleraciones, requieren una estructura más rígida para evitar deformaciones. En el proceso de diseño se presentaron dos especificaciones que están en clara contraposición: por un lado, la mesa debía soportar los esfuerzos dinámicos minimizando las deformaciones, lo cual se puede lograr aumentando la masa del conjunto, pero al mismo tiempo, la exigencia de altas aceleraciones obligaba a reducir las inercias en juego.

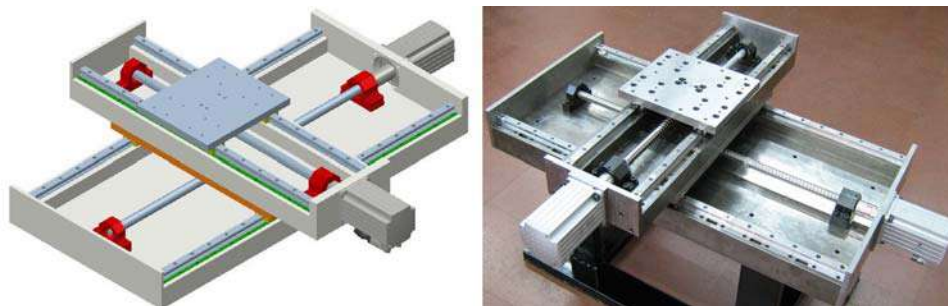


FIGURA 1-2: Modelo 3D de la mesa XY

## PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Para el diseño de la mesa se utilizó un procedimiento iterativo a partir de la suposición de valores iniciales para ciertas variables de diseño. En la FIGURA 1-3 se puede ver un diagrama de flujo del mencionado procedimiento.

Como comienzo de este proceso se definió las prestaciones de la máquina para un potencial usuario. Esto incluyó área de trabajo, tipo y ciclos de trabajo, cargas útiles, precisión y vida útil de la máquina, entre otros. A partir de estos datos se obtuvieron los parámetros básicos de la máquina, entre los cuales se pueden citar el área de trabajo, aceleraciones máximas, errores geométricos permitidos, vida útil de las partes, carga útil, velocidades máximas, etc.

Una vez conocidas las condiciones de diseño, y realizadas algunas suposiciones (masas de los carros y paso del tornillo) se seleccionaron elementos comerciales como el tornillo-tuerca y el conjunto patines-rieles.

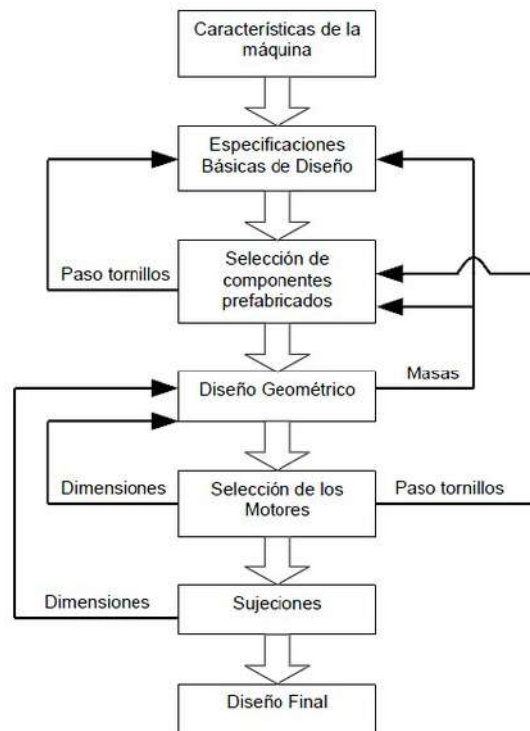


FIGURA 1-3: Diagrama de flujo del procedimiento de diseño

Teniendo en cuenta las dimensiones de los elementos seleccionados y las deformaciones máximas permitidas, se diseñaron las bases de cada eje de desplazamiento y se realizó el mecanizado de otras piezas. Finalizado el diseño de estas piezas, se logró conocer con mayor precisión las masas en juego, con lo que se pudo recalculer los elementos prefabricados y comprobar el cumplimiento de las especificaciones.

Seguidamente se procedió a la selección de los motores, teniendo en cuenta las aceleraciones y velocidades de diseño, así como también los valores de inercia en juego. Se recalculó el valor del paso del tornillo que minimiza el torque motor necesario, y se comparó este valor con el del paso seleccionado.

Con el torque máximo definido para cada motor, se calcularon los elementos de unión necesarios para fijar las distintas piezas del ensamblaje. Estos elementos debían proporcionar la unión suficiente para evitar movimientos relativos entre las mismas, bajo las condiciones más desfavorables.

Finalmente, con las fijaciones definidas, se completó el diseño de los elementos a fabricar.



## ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

Dentro de las especificaciones de diseño se definió que el dispositivo cumpliera con las exigencias de mecanizado de alta velocidad. Por lo tanto, esto se tomó como punto de partida. Tales especificaciones se detallan en la TABLA 1-1.

Requerimientos	Valor
Aceleración lineal máxima (de cada eje)	$1g (9,8m/s^2)$
Velocidad lineal máxima	$42m/min (0,7m/s)$
Deformaciones estáticas máximas	$e \leq 20 \mu m$
Área de trabajo (X x Y)	$530mm \times 730mm$
Vida útil	$80.000hs$
Carga útil	$145kg$

TABLA 1-1: Especificaciones de diseño

También fue necesario determinar las condiciones básicas de esfuerzos y velocidades de las distintas etapas de un mecanizado de alta velocidad típico. Para esto, se debieron tener en cuenta las distintas condiciones de operación de cada eje de la máquina, que se definen a continuación.

- Maquinado: Se suponen diferentes operaciones de desbaste y acabado usando diferentes combinaciones de diámetros de fresas y velocidades de avance. A partir de estas operaciones y sus porcentajes de utilización se calculó una fuerza efectiva media y una velocidad de avance media.
- Aceleración y desaceleración: Este es el caso en que el eje cambia de velocidad, ya sea que acelera desde cero hasta una velocidad determinada o que se está moviendo con cierta velocidad y debe detenerse. La fuerza que actúa en este caso está relacionada con la aceleración máxima del eje y con las masas en movimiento.
- Movimientos rápidos: Los movimientos rápidos representan los movimientos en vacío (sin fuerza de maquinado) donde el eje se mueve con la velocidad máxima. Bajo estas condiciones, actúa la fuerza de fricción entre los patines y las guías más la fricción entre el tornillo y la tuerca.
- En reposo, con maquinado: En esta situación, un eje se encuentra quieto mientras el otro está maquinando, por lo que el eje que no se mueve también debe soportar los esfuerzos de corte.

- En reposo, sin maquinado: En este último caso el sistema no soporta ningún esfuerzo ya que se están realizando labores de cambio de herramienta, cambio de pieza de trabajo, entre otras. Sin embargo, esta se debe tener en cuenta para el cálculo de la vida útil de la máquina.

Para cada una de las condiciones de trabajo mencionadas anteriormente se debieron definir las fuerzas que actúan, la velocidad lineal y rotacional, y el porcentaje de aplicación de cada caso. Los resultados encontrados, luego de realizar los cálculos pertinentes, se pueden visualizar en la TABLA 1-2.

Operación	Eje X			Eje Y		
	n [rpm]	F [N]	Uso [%]	n [rpm]	F [N]	Uso [%]
Maquinado	900	825	30	900	825	30
Movimientos rápidos	4.200	120	5	4.200	130	5
Aceleración y desaceleración	450	1.537	8	450	2625	8
En reposo, con maquinado	0	825	30	0	825	30
En reposo, sin maquinado	0	0	27	0	0	27

TABLA 1-2: Condiciones de operación de cada eje

## SELECCIÓN DE COMPONENTES PREFABRICADOS

Como se dijo anteriormente algunos elementos se fabricaron, mientras que para otras partes de la mesa se seleccionaron elementos comerciales prefabricados. Estos son el conjunto tornillo-husillo de bolas recirculantes y el conjunto patines-guías. También se seleccionaron los soportes para el tornillo, el tipo de maquinado de los extremos del tornillo, el soporte para la tuerca, etc.

Para la selección del husillo de bolas se calculó la capacidad de carga dinámica del husillo teniendo en cuenta un promedio de fuerzas, para lo cual se utilizaron las condiciones de operación calculadas anteriormente.

Utilizando las fórmulas y procedimientos definidos por el fabricante del husillo se obtuvieron los requerimientos de carga dinámica para los ejes X e Y, cuyo valores fueron  $C_{TX} = 11.066 \text{ N}$  y  $C_{TY} = 15.678 \text{ N}$ , respectivamente.

Con estos datos se seleccionó el tornillo más adecuado y se definió el diámetro y paso del mismo. Teniendo en cuenta un balance entre la velocidad y torque de los motores, se optó por un paso del tornillo de  $10 \text{ mm}$ . Una vez fijado el paso del tornillo

se determinó el diámetro mínimo para cumplir con las especificaciones con un valor de 25 mm. Los datos de los tornillos seleccionados se muestran en la TABLA 1-3.

Descripción	Eje X	Eje Y
Diámetro del tornillo [mm]	25	25
Paso del tornillo [mm]	10	10
Largo total del tornillo [mm]	743	943
Momento de inercia [kg m <sup>2</sup> ]	1,78 10 <sup>-4</sup>	2,25 10 <sup>-4</sup>
Capacidad de carga dinámica [N]	15.700	15.700
Precarga [%]	5	5
Torque de fricción [N]	0,10 – 0,29	0,10 – 0,29

TABLA 1-3: Datos de los husillos seleccionados

Luego de seleccionar los tornillos, se recalculó el valor de la vida útil, obteniéndose un valor de 228.473 hs para el eje X y de 80.342 hs para el eje Y.

Por otro lado, la precisión de posicionamiento del tornillo está directamente relacionada con el tipo y grado de tolerancia, que garantiza un error máximo de desviación a lo largo del recorrido. Teniendo en cuenta un compromiso entre el error de posición y costo, se seleccionó un tornillo laminado de precisión con un valor de tolerancia media (T5), lo que garantiza una desviación máxima de 30  $\mu m$  a lo largo de todo el recorrido del eje X, y de 35  $\mu m$  para el eje Y.

Finalmente, una vez seleccionados los tornillos, se pudo calcular la velocidad de giro admisible y la carga axial admisible, según los procedimientos indicados por el fabricante. Ambos parámetros dependen de la longitud y el diámetro del tornillo, así como también del tipo de soporte utilizado. En nuestro caso, se utilizó un soporte fijo en un extremo (con una rigidez de 450 N/ $\mu m$ ) y uno flotante en el otro extremo. Teniendo en cuenta estas características, se obtuvieron los resultados mostrados en la TABLA 1-4.

Descripción	Eje X	Eje Y
Velocidad máxima [rpm]	11.788	6.213
Fuerza máxima admisible [N]	41.763	22.014

TABLA 1-4: Resultados de velocidad y fuerza

Según las especificaciones de diseño, la velocidad máxima lineal es de 42 m/min, resultando una velocidad rotacional de 4.200 rpm, por lo que se concluyó que

los tornillos que se seleccionaron cumplen con los requerimientos de velocidad máxima. En cambio, como la carga axial máxima depende del torque máximo del motor y de las inercias en juego, que todavía no se conocían, se debió calcular posteriormente y comprobar que no superaran los valores admisibles.

La selección de los patines y los rieles se realizó teniendo en cuenta la vida útil de los mismos y las deformaciones máximas admisibles debido a los esfuerzos dinámicos. Para la selección en base a la vida útil, se siguió un proceso de cálculo similar al proceso de selección del husillo de bolas. La deformación máxima para el conjunto (patines, guías y bases) es una especificación de diseño y se fijó en 20  $\mu\text{m}$ , resultando en una deformación máxima para cada conjunto rieles–patines de 6  $\mu\text{m}$ .

Utilizando los datos de cargas horizontales y verticales, las cuales se muestran en la TABLA 1-5 y TABLA 1-6, derivadas de las condiciones de operación definidas en las especificaciones de diseño, se determinó la capacidad de carga dinámica.

Eje X			Eje Y		
n [rpm]	F [N]	Uso [%]	n [rpm]	F [N]	Uso [%]
9	825	30	9	825	30
42	26	5	42	37	5
4,5	1.443	8	4,5	2.531	8
0	825	30	0	825	30
0	0	27	0	0	27

TABLA 1-5: Esfuerzos horizontales para cada eje

Eje X			Eje Y		
v [m/min]	F [N]	Uso [%]	v [m/min]	F [N]	Uso [%]
0	1.830	60	0	2.908	60
5,16	1.005	40	5,16	2.083	40

TABLA 1-6: Esfuerzos verticales para cada eje

Una vez hallados los requerimientos de carga dinámica a través de los procedimientos indicados por el fabricante y calculadas las deformaciones máximas permitidas se seleccionaron patines tamaño 25. En la TABLA 1-7 se presentan los datos de los patines seleccionados.

Descripción	Eje X	Eje Y
Tamaño	25	25

Precisión	Clase H	Clase H
Precarga [% de la carga dinámica]	0,08 C	0,08 C
Capacidad de carga dinámica (C) [N]	22.800	22.800
Longitud del riel [mm]	835	1050
Rigidez para cargas verticales [ /N]	$1,95 \cdot 10^{-3}$	$1,95 \cdot 10^{-3}$
Rigidez para cargas laterales [ /N]	$2,28 \cdot 10^{-3}$	$2,28 \cdot 10^{-3}$
Deformación vertical [ ]	3,4	3,4
Deformación horizontal [ ]	5,36	5,36

TABLA 1-7: Datos de los patines y rieles seleccionados

Para la selección de los motores se debieron definir las distintas condiciones de operación, las cuales se resumen a continuación:

- Máxima aceleración, con maquinado: Teniendo en cuenta las ecuaciones de la dinámica del sistema, se calculó el torque requerido para lograr la máxima aceleración de diseño, teniendo en cuenta la fuerza máxima de maquinado, de donde se obtuvo un torque de 9 Nm para el eje X y 12,5 Nm para el eje Y. La velocidad máxima para esta operación es la máxima de maquinado, de 12 m/min (1.200 rpm). Este punto debe estar dentro de la curva de torque máximo.
- Máxima aceleración en vacío: El torque se calculó de forma similar al punto anterior, pero eliminando la fuerza de maquinado, con lo que se obtuvo un torque de 7,1 Nm para el eje X y 10,6 Nm para el eje Y. La velocidad para este punto de operación es la velocidad máxima de diseño, de 4,2 m/min (4200 rpm). Este punto también se debe encontrar dentro de la curva de torque máximo.
- Máxima velocidad en vacío: En este punto de operación se tiene la máxima velocidad de diseño (4.200 rpm) y el torque de fricción (0,58 Nm para el eje X y 0,6 Nm para el eje Y), ya que el eje se mueve a velocidad constante.
- Punto de operación Eficaz: El torque de este punto es el torque eficaz, teniendo en cuenta las distintas operaciones del sistema de donde se obtienen 2,75 Nm para el eje X y 3,7 Nm para el eje Y. La velocidad para este punto es la velocidad media de 516 rpm.

Teniendo en cuenta los distintos puntos de operación para cada uno de los ejes (TABLA 1-8) y los momentos de inercia mínimos requeridos se seleccionaron los motores. Con esta selección y teniendo en cuenta el torque máximo de los motores se seleccionó el controlador adecuado.

Operación	Eje X		Eje Y	
	n [rpm]	T [Nm]	n [rpm]	T [Nm]
Máxima aceleración con maquinado	1.200	8,8	1.200	12,7
Máxima aceleración en vacío	4.200	7,3	4.200	11,1
Máxima velocidad en vacío	4.200	0,6	4.200	0,6
Punto de operación eficaz	516	2,7	516	3,8

TABLA 1-8: Puntos de operación para cada eje

El proceso de selección dio como resultado el mismo conjunto motor-controlador para ambos ejes. El motor seleccionado es de la empresa FESTO, cuyas características principales, extraídas del manual [4] se describen en la TABLA 1-9.

Motor FESTO MTR-AC-100-3S			
Datos eléctricos generales		Datos mecánicos generales	
Tensión nominal [V]	325	Momento de giro en reposo [Nm]	4,74
Corriente nominal del motor [A]	5	Momento de giro nominal [Nm]	3,53
Corriente permanente en reposo [A]	6,7	Régimen nominal [1/min]	4300
Pico de corriente [A]	20	Momento de giro máximo [Nm]	12,2
Constante del motor [Nm/A]	0,711	Revoluciones máximas [1/min]	5320
Resistencia de la bobina [ $\Omega$ ]	1,5	Momento de inercia del motor [ $kg\ cm^2$ ]	2,6
Inductancia de la bobina [mH]	4,629		
Potencia nominal [W]	1417		
Tensión del freno [V DC]	24		
Potencia del freno [W]	13		

TABLA 1-9: Especificaciones del motor

A partir del motor seleccionado se eligió un controlador, también de la empresa FESTO, cuyas características básicas, extraídas del manual [5], se detallan en la TABLA 1-10.

Controlador FESTO SEC-AC-305	
Datos eléctricos generales	
Tensión nominal [ $V_{AC}$ ]	230
Tensión de circuitos electrónicos [V DC]	24
Corriente para 24 V [mA]	350
Potencia nominal con fuente DC [VA]	1500
Potencia nominal con fuente AC [VA]	1000
Pico máximo de potencia durante 10 seg. [VA]	3000
Voltaje del circuito intermedio max. [V DC]	340

Corriente del circuito intermedio max. [ A ]	5
Corriente nominal [ $A_{eff}$ ]	5
Pico de corriente durante 10 seg. [ $A_{eff}$ ]	10

TABLA 1-10: Especificaciones del controlador

## MODELO DEL SISTEMA

Para la construcción de un modelo matemático del sistema físico, se dividió al mismo en dos partes: una parte rotacional y otra lineal. Además se consideró un modelo rígido que tiene en cuenta la fricción viscosa, la cual es proporcional a la velocidad, y se supuso que las partes mecánicas en juego no sufren deformaciones.

Planteando las ecuaciones de movimiento, y teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$J_c \ddot{\theta} = T_m - B_\theta \dot{\theta} - T_r \quad [\text{ecuación rotacional}]$$

Donde:

$J_c$  : momento de inercia combinado del motor, el tornillo y el acoplamiento  
[  $kg\ m^2$  ]

$T_m$  : torque del motor [  $N\ m$  ]

$B_\theta$  : coeficiente de viscosidad rotacional [  $N\ m\ seg$  ]

$T_r$  : torque resistente ejercido por la mesa [  $N\ m$  ]

$$M \ddot{x} = F_r - B_x \dot{x} - F_p \quad [\text{ecuación lineal}]$$

Donde:

$M$  : masa del carro y la pieza que soporta [  $kg$  ]

$F_r$  : reacción al torque resistente que aplica la mesa sobre el tornillo [  $N$  ]

$B_x$  : coeficiente de viscosidad lineal [  $kg / seg$  ]

$F_p$  : fuerza de perturbación del sistema (maquinado y fricción) [  $N$  ]

Considerando que la fuerza y el torque se encuentran relacionados con el paso del tornillo,  $q$  [  $m / rev$  ], por medio de la siguiente ecuación:

$$T = F \frac{q}{2\pi}$$

A fin de simplificar las ecuaciones se definió la variable  $r$  como el paso del tornillo, medido en  $[m / rad]$ , quedando:

$$r = \frac{q}{2\pi}$$

Inicialmente se consideró que el sistema era rígido, es decir, que no sufría deformaciones. A partir de esto se establecieron relaciones entre las variables lineales y angulares, tal como se muestra a continuación:

$$x = r\theta ; \dot{x} = r\dot{\theta} ; \ddot{x} = r\ddot{\theta}$$

Utilizando la ecuación rotacional y la lineal del modelo, conjuntamente con las relaciones expresadas anteriormente, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$J_c = T_m - B_\theta \frac{\ddot{x}}{r} - r(M \ddot{x} + B_x \dot{x} + F_p)$$

Finalmente, reordenando esta ecuación y despejando el torque del motor ( $T_m$ ) se llegó a la siguiente expresión:

$$T_m = \left( \frac{J_c}{r} + rM \right) \ddot{x} + \left( \frac{B_\theta}{r} + rB_x \right) \dot{x} + rF_p \text{ [ecuación final del sistema]}$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación final del sistema, y considerando que no ingresan perturbaciones al mismo, se obtuvo la función transferencia del torque motor a la posición:

$$\frac{X(s)}{T_m(s)} = \frac{r}{s(sJ + B)}$$

Donde:

$$J = J_c + r^2 M$$

$$B = B_\theta + r^2 B_x$$

$J$ : inercia combinada del sistema  $[kg m^2]$

$B$ : viscosidad combinada del sistema  $[kg m^2 / seg]$

$J_c$ : momento combinado del motor, el tornillo y el acoplamiento  $[kg m^2]$

$M$ : masa del carro y pieza que soporta  $[kg]$

$B_\theta$ : coeficiente de viscosidad rotacional  $[kg m^2 / seg]$

$B_x$ : coeficiente de viscosidad lineal  $[kg / seg]$

$r$ : paso del tornillo  $[m / rad]$



A partir de la función transferencia, y utilizando un retenedor de orden cero (zero order hold, ZOH), se obtuvo la función transferencia discreta que se muestra a continuación:

$$\frac{X(z)}{T_m(z)} = \frac{k_1 z + k_2}{(z-1)(z-p)}$$

Donde:

$$p = e^{\frac{B}{J}}$$

$$k_1 = \frac{rT}{B \ln p} (1 - p + \ln p)$$

$$k_2 = \frac{rT}{B \ln p} (-1 + p + p \ln p)$$

$T$ : período de muestreo [seg]

$r$ : paso del tornillo [m/rad]

También a partir de la ecuación final del sistema se pudo plantear un modelo continuo en variable de estado, el cual se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -B/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ r/J \end{bmatrix} g_m + \begin{bmatrix} 0 \\ -r^2/J \end{bmatrix} g_p^F$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix}$$

Luego, conocidos los parámetros B y J, se pudo discretizar la ecuación anterior, tal como se indica en [3].

Con esto se dio por finalizada la etapa concerniente al conocimiento de la mesa XY.

## **CAPÍTULO 2: INTEGRACIÓN DEL CONTROLADOR**

### **INTRODUCCIÓN**

La tecnología de control numérico ha revolucionado las máquinas de proceso, actividades como la mecanización de materiales la incorporan optimizando la fabricación de piezas complejas a alta velocidad. En los últimos años las máquinas, especialmente máquinas de herramienta, de Control Numérico Computarizado se han convertido en uno de los elementos más importantes en la automatización. La utilización de tecnologías CNC supone que las máquinas de mecanizado funcionan de forma automática, por lo cual es ventajoso para medianos lotes de producción. Es consecuentemente ésta una de las razones fundamentales por las que aumenta notablemente la productividad de la industria.

Las máquinas herramientas modernas requieren de sistemas de posicionamiento capaces de seguir, con errores reducidos, trayectorias con valores elevados de velocidad y aceleración. Para ello, estos sistemas deben ser diseñados y controlados para obtener un ancho de banda adecuado y buena robustez a las perturbaciones externas y a las no linealidades del sistema.

Finalmente se puede decir que estos sistemas presentan ventajas y desventajas, pudiéndose citar las siguientes:

#### **Ventajas:**

- Permiten obtener mayor precisión en el mecanizado.
- Permiten mecanizar piezas más complejas.
- Se puede cambiar fácilmente de mecanizar una pieza a otra.
- Se reducen los errores de los operarios.
- Cada vez son más baratos los tornos CNC.

#### **Desventajas:**

- Necesidad de realizar un programa previo al mecanizado de la primera pieza.
- Coste elevado de herramientas y accesorios.
- Conveniencia de tener una gran ocupación para la máquina debido a su alto coste.

## SELECCIÓN DEL CONTROLADOR

Para la selección del controlador se realizó un análisis de los CNC disponibles en el mercado, y considerando las características deseadas y los precios, se eligió el controlador ADVANTAGE 400 de la empresa Delta Tau Data Systems Inc. El mismo posee una interfase de usuario integrada que permite la programación mediante código G estándar y posee integrados los algoritmos de interpolación para el movimiento coordinado de varios ejes. Para darle mayor flexibilidad al sistema se le adicionó una placa especial denominada Turbo PMAC2 PC/104 que permite la programación de lazos personalizados para luego ser utilizados en la ejecución de movimientos controlados.



FIGURA 2-1: Controlador ADVANTAGE 400

En la FIGURA 2-1 se puede ver la parte frontal y trasera del controlador seleccionado.

Finalmente en la FIGURA 2-2 se puede ver la estructura de la placa Turbo PMAC2 PC/104



FIGURA 2-2: Placa Turbo PMAC2 PC/104

A continuación se presentan las características del hardware, software y demás accesorios que conforman el sistema.

### **Características del Hardware**

- 40 MHz DSP563xx CPU (OPT-5AF 80 MHz 560xx equivalent)
- 128k x 24 internal zero-wait-state SRAM
- 512k x 8 flash memory for user backup and firmware
- Latest released firmware version
- RS-232 serial interface
- 4 channels axis interface circuitry, each including:
  - 12-bit +/-10V analog output
  - Pulse-&-direction digital output
- Quadrature encoder inputs A, B, C, channels with differential/single-ended drivers
- 4 input flags, 2 output flags at TTL levels
- 3 PWM top-and-bottom pairs (unbuffered)
- 50-pin IDC header for amplifier/encoder interface
- 34-pin IDC header for flag interface
- PID/notch/feedforward servo algorithms
- 1-year warranty from date of shipment

### **Características del Software**

- **Trajectory Generation Features**
  - Linear interpolation mode with S-curve accel/decel
  - Circular interpolation mode with S-curve accel/decel
  - Rapid point-to-point move mode
  - Cubic B-spline interpolation mode
  - Cubic Hermite-spline (PVT) interpolation mode
  - Automatic move-until-trigger functions with hardware capture
  - Interactive jog moves
  - Optional multi-move lookahead for velocity and acceleration limiting
- **Servo Features**
  - Standard digital PID feedback filter
  - Velocity, acceleration, and friction feedforward
  - 2nd-order notch/low-pass filter
  - Gains changeable at any time
  - Programmable input, integrator, and output limits
  - Optional 35-term pole-placement servo filter
- **Commutation Features**
  - Sinusoidal commutation of AC servo motors
  - Vector control of AC induction motors
  - Digital current-loop closure with direct PWM output (PMAC2)
- **Compensation Features**
  - Position compensation tables (1D and 2D)
  - Torque compensation tables
  - Backlash compensation
  - Tool radius compensation

- **Safety Features**
  - Hardware and software overtravel limits
  - Amplifier enable/fault handshaking
  - Following error limits
  - Integrated current limit
  - Encoder loss detection (some versions)
  - Watchdog timer
  - Program and communications checksums
- **Computational Features**
  - Real-time multi-tasking operating system
  - 48-bit floating-point math for user programs
  - Trigonometric and transcendental functions
  - Automatic type-matching of different variable types
- **Feedback sensor types that can be processed**
  - Digital quadrature encoders
  - Sinusoidal encoders, interferometers
  - Resolvers
  - Potentiometers
  - LVDTs, RVDTs
  - Parallel-format encoders, interferometers
  - MLDTs
  - Serial absolute encoders (e.g. SSI)
- **Coordination and Master/Slave Features**
  - User-defined coordinate systems for automatic coordination of axes
  - Separate coordinate systems for independent motion of axes
  - Multi-motor axis support (e.g. gantries)
  - Dynamic axis transformations (e.g. offsets, rotations, mirroring)
  - Electronic gearing (no programming required)
  - Electronic cams with programmable profiles
- **Motion Program Features**
  - High-level programming language
  - Automatic sequenced execution of moves
  - Calculations and I/O synchronous to motion
  - Axes programmed in user engineering units
  - Motion values as constants or expressions
  - Automatic coordination of multiple axes
  - Ability to execute G-code programs
- **PLC Program Features**
  - Execution asynchronous to programmed motion
  - I/O control as in hardware PLC
  - Executive functions for standalone applications
  - Safety and status monitoring
  - Servo gain scheduling
  - Data reporting functions
  - Access to all registers in controller

### **Accesorios adicionales**

### **Processor and Firmware Options**

**OPT-5CF** - 80 MHz DSP563xx CPU (160 MHz 560xx equivalent)

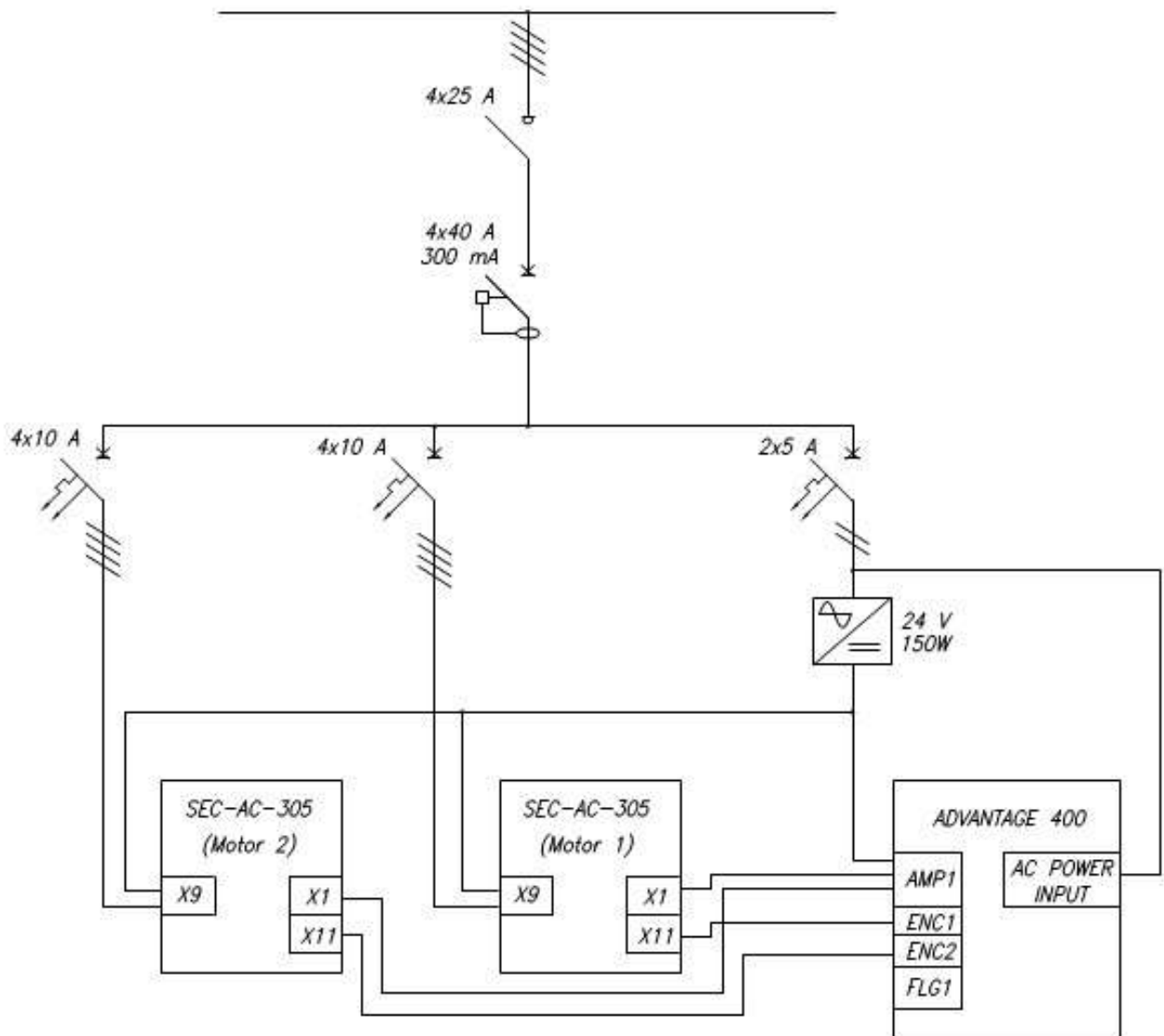
**Base Board Options**

**OPT-2A** - PC/104 Bus Stack Interface

**CONEXIONES**

**Conexiones de potencia**

Para llevar a cabo la integración del controlador ADVANTAGE 400 con la mesa de posicionamiento se utilizaron los esquemas eléctricos que se muestran en las figuras siguientes. Donde se describen los circuitos de potencia y comando para llevar a cabo dicha integración.



**FIGURA 2-3:** Conexiones de potencia

En la FIGURA 2-3 se detallan las conexiones entre el controlador ADVANTAGE 400 y los drivers SEC-AC-305 de los servomotores correspondientes al circuito de potencia. Para suministrarle energía al controlador ADVANTAGE 400 se utilizó la entrada monofásica de corriente alterna (85V - 264V). Para ello se conectaron la fase, el neutro y la puesta a tierra en el conector AC POWER INPUT del controlador, de acuerdo al esquema de conexión provisto por el manual del fabricante del ADVANTAGE 400, el cual puede apreciarse en la FIGURA 2-4.

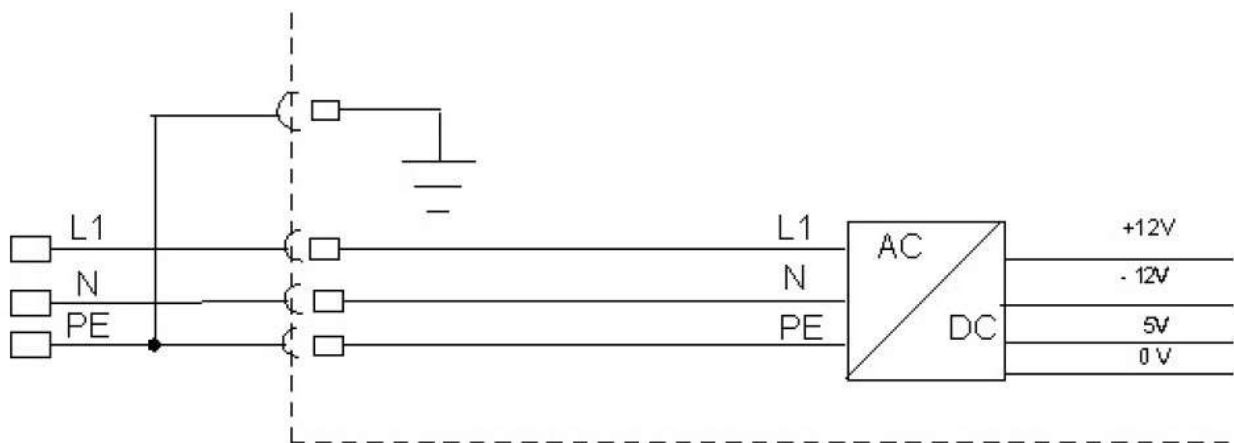


FIGURA 2-4: Interfase AC/DC

También se le suministró una entrada de corriente continua en el rango de 12V – 24V, que se utiliza para alimentar las salidas digitales y las líneas de amplificador habilitado.

Dado que la potencia de esta entrada depende de las salidas digitales que se utilicen, y teniendo en cuenta que la corriente máxima de cada entrada es de 0,5 A, resulta una potencia de 12 W como máximo para cada salida digital. Para calcular la potencia que debía tener la fuente de alimentación se supuso un máximo de 8 salidas digitales, para lo cual la potencia de la fuente resultó ser de 96 W. Finalmente se seleccionó una fuente de 24 V y 100 W.

La conexión de la entrada de corriente continua se realizó en los pines 24 y 25 del conector AMP1 perteneciente al controlador ADVANTAGE 400, como puede apreciarse en la TABLA 2-1.

AMP 1			
Pin#	Symbol	Function	Description
1	DAC1A+	Output	Analog Out X-Axis
2	DAC1A-	Output	Analog Out X-Axis
3	DAC2A+	Output	Analog Out Y-Axis
4	DAC2A-	Output	Analog Out Y-Axis
5	DAC3A+	Output	Analog Out Z-Axis
6	DAC3A-	Output	Analog Out Z-Axis
7	DAC4A+	Output	Analog Out U / A / S
8	DAC4A-	Output	Analog Out U / A / S
9	AGND	Output	Ref. for command (analog) out
10	AMP1-ENA	Output	Amplifier Enable X-Axis
11	AMP2-ENA	Output	Amplifier Enable Y-Axis
12	AMP3-ENA	Output	Amplifier Enable Z-Axis
13	AMP4-ENA	Output	Amplifier Enable U / A / S
14	AMP5-ENA	Output	Amplifier Enable U / A / S
15	AMP1-FLT	Input	Amplifier fault 1 X-Axis
16	AMP2-FLT	Input	Amplifier fault 2 Y-Axis
17	AMP3-FLT	Input	Amplifier fault 3 Z-Axis
18	AMP4-FLT	Input	Amplifier fault 4 U / A / S-Axis
19	AGND	Output	Ref. for command (analog) out
20	AMP5-FLT		Amplifier fault 5 V / B-Axis
21	DAC5A+		Analog Out V / B-Axis
22	DAC5A-		Analog Out V / B-Axis
23	NC		
24	Ext +24V	Input	External +24V
25	Ext GND	Input	External ground, "FIELDRETURN"

TABLA 2-1: ADVANTAGE 400 - Pines del conector AMP1

Los controladores SEC-AC-305 de los motores Festo poseen una entrada trifásica de corriente alterna 340V – 480V y 8 A, junto con una entrada externa de corriente continua de 24 V y una potencia de 12 W. Ambas entradas deben conectarse en el conector X9, cuyos pines se describen en la TABLA 2-2.

X9		
Pin	Symbol	Meaning
1	L1	AC input (400 Veff)
2	L2	AC input (400 Veff)
3	L3	AC input (400 Veff)
4	UZK+	Positive intermediate circuit voltage
5	UZK-	Negative intermediate circuit voltage
6	24V+	24V DC auxiliary supply
7	24V-	Earrh / GND for auxiliary supply

TABLA 2-2: SEC-AC-305 – Pines del conector X9



## Conexiones de comando

Para realizar las conexiones correspondientes a la etapa de comando se utilizó el diagrama de conexiones que se muestra en la FIGURA 2-5. En el mismo se indican las conexiones de los pulsadores de arranque y parada de emergencia, los sensores de final de carrera y de posición de referencia (Home Position) a los puertos tanto de los controladores SEC-AC-305, como también los del controlador ADVANTAGE 400.

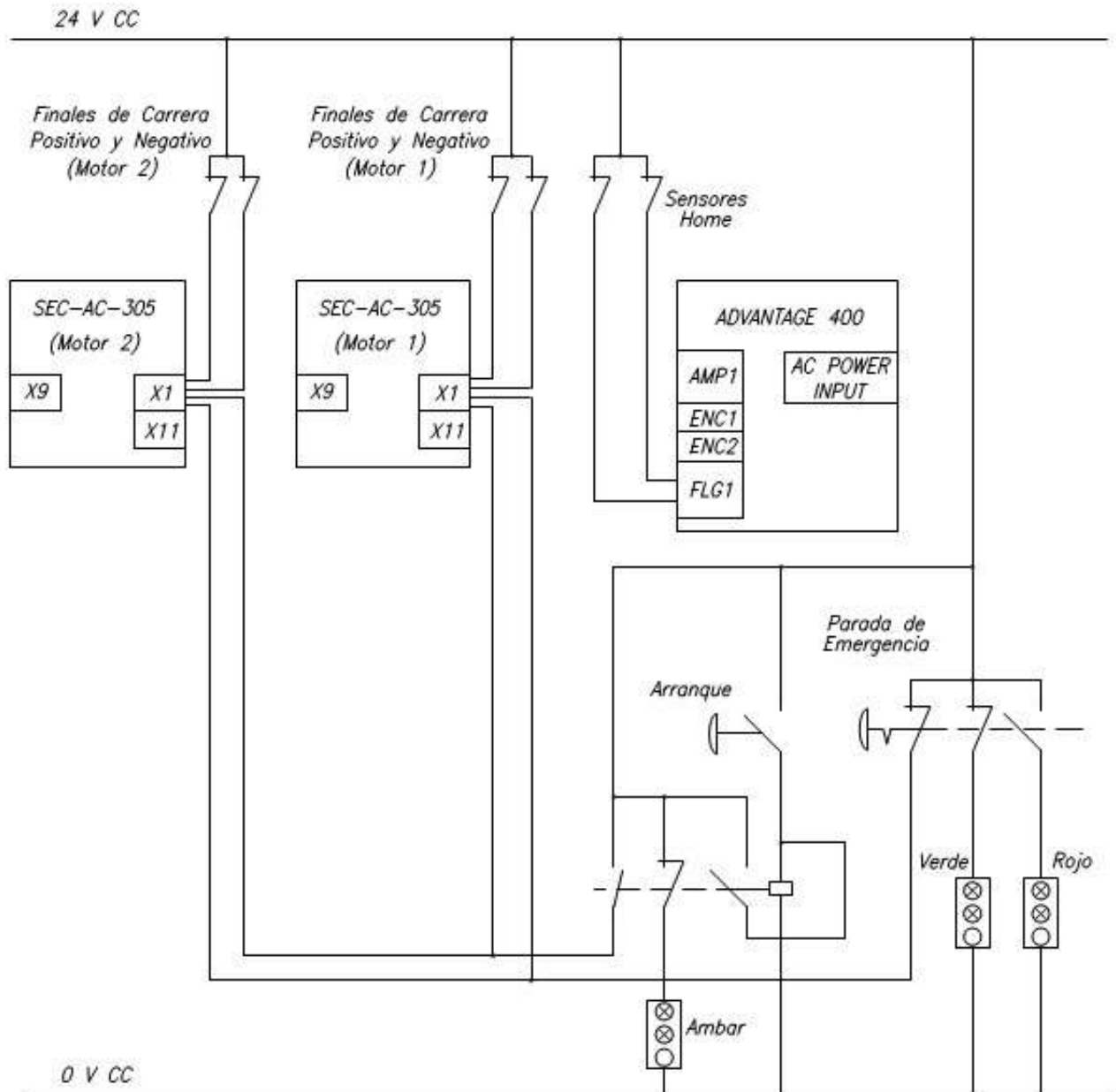


FIGURA 2-5: Conexiones de comando

## Conexión de los servomotores

Para poder comandar los servomotores desde el controlador ADVANTAGE 400 se utilizaron sus salidas analógicas ubicadas en el conector AMP1, las cuales se conectaron a la entrada analógica de referencia de los controladores SEC-AC-305 ubicadas en el conector X1. Las salidas analógicas se detallan en la TABLA 2-1, y las entradas analógicas de referencia de los controladores SEC-AC-305 se describen en la TABLA 2-3.

La conexión entre estas se realizó teniendo en cuenta que la salida del controlador es diferencial, por lo cual se conectaron de la salida analógica los pines positivo y negativo (DAC1A+ y DAC1A-) a sus respectivos pines de entradas en el conector X1 del controlador SEC-AC-305 (Ain0 y Ain0/), dejando el pin 9 correspondiente a la tierra (AGND) flotante. Esto mismo se realizó tanto para el servomotor 1 como para el servomotor 2, utilizándose cuatro salidas analógicas del conector AMP1 (DAC1A+, DAC1A-, DAC2A+ y DAC2A-).

X1			
Pin	Symbol	Value	Specification
1	Scrhim	0 V	Screening / shield connection
14	Scrhim	0 V	Screening / shield connection
2	Ain0	$\pm 10V \pm 5\%$ Ri=20 k $\Omega$ $\pm 1\%$	Analogue nominal value input (A/B signals) channel 0. Differential max. 25 V input voltage
15	Ain0/		Reference connection, analogue connection channel 0
3	Ain1	$\pm 10V \pm 5\%$ Ri=20 k $\Omega$ $\pm 1\%$	Analogue nominal value input (A/B signals) channel 0. Differential max. 25 V input voltage
16	Ain1/		Reference connection, analogue connection channel 0
4	+VREF	+10V $\pm 5\%$	Reference voltage output (for optional nominal value potentiometer)
17	AMON0	$\pm 10V \pm 5$	Analogue monitor output 0
5	AMON1	$\pm 10V \pm 5$	Analogue monitor output 1
18	+ 24V DC	$\pm 24V \pm 5\%$ max. 200 mA	24 V DC power supply output, not resistant to short circuits, supply via power plug X3, common potential for switching signals of digital inputs (e.g. for limit switches)
6	GND	GND	Digital earth / GND
19	Din0	POS-Bit0	Position selection bit 0
7	Din1	POS-Bit0	Position selection bit 1
20	Din2	POS-Bit0	Position selection bit 2
8	Din3	POS-Bit0	Position selection bit 3
21	Din4	ENA-PWR	Final output stage enable

9	Din5	ENA-CL	Regulator enable, reacts to falling signal edge
22	Din6	END-0	Limit switch negative
10	Din7	END-1	Limit switch positive
23	Din8	START	Start positioning
11	Din9	POS-Bit0	Position selection bit 0
24	Dout0	READY	Ready-to-operate
12	Dout1	PRG-1	Freely programmable output
25	Dout2	PRG-2	Freely programmable output
13	Dout3	PRG-3	Freely programmable output

TABLA 2-3: SEC-AC-305 – Pines del conector X1

A continuación la FIGURA 2-6 muestra el esquema eléctrico correspondiente a las salidas analógicas diferenciales del controlador.

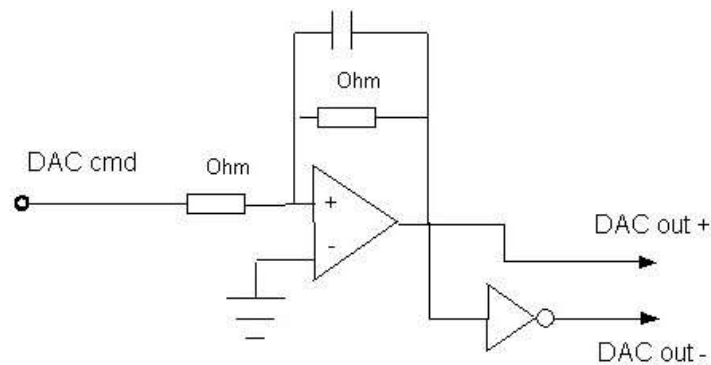


FIGURA 2-6: ADVANTAGE 400 – Salida diferencial

Las especificaciones correspondientes a las señales de salida diferencial se presentan en la TABLA 2-4.

Parameter	Min	Max	Units
Voltage range	-10	10	V
Output current	-3	3	mA
Resolution	12 bit		

TABLA 2-4: ADVANTAGE 400 – Salidas diferenciales

Para realizar esta conexión se utilizó cable apantallado de par trenzado para reducir las interferencias en la señal de salida. Este fue uno de los inconvenientes que se tuvo debido a que inicialmente se utilizó un cable que no cumplía con lo especificado en el manual y las interferencias afectaban al sistema. Con el uso del cable mencionado se solucionaron todos los problemas relacionados con las interferencias.

Cada interfase de motor posee una entrada digital para detectar fallas en el motor denominada Amplifier Default, para nuestro sistema se utilizaron dos de estas entradas que se encuentran en los pines 15 y 16 del puerto AMP1 del controlador ADVANTAGE 400. Una para el motor correspondiente al eje X y otra para el eje Y. Estas se conectaron a la salida digital cero del controlador SEC-AC-305 para cada motor, la cual se encuentra en el pin 24 del conector X1 (Dout0).

La habilitación y deshabilitación de los motores se configuró para que se realice directamente desde los pulsadores de arranque y parada respectivamente, dejando sin conexión las salidas que posee el controlador ADVANTAGE 400 destinadas a esta misma operación.

### Conexión de los sensores de realimentación

En nuestro sistema para medir la posición de los motores, se utiliza un *resolver*, la señal del mismo ingresa al controlador SEC-AC-305, el cual posee un emulador de *encoder* cuya señal es ingresada al controlador ADVANTAGE 400, el cual es capaz de leer un *encoder* incremental con dos entradas diferenciales en cuadratura (A, B) y un canal de referencia C.

Para las conexiones de los encoders se utilizaron los pines del conector ENC n cuya descripción se detalla en la TABLA 5 mostrada a continuación.

Enc n			
Pin#	Symbol	Function	Description
1	CHA1+	Input	Pos. A Chan.
2	GND	Common	Digital Reference
3	CHB1-	Input	Neg. B Chan.
4	CHC1+	Input	Pos. C Chan.
5	A+5V	Output	Digital Supply
6	NC		
7	NC		
8	NC		
9	CHA1-	Input	Neg. A Chan.
10	CHB1+	Input	Pos. B Chan.
11	GND	Common	Digital Reference
12	CHC1-	Input	Neg. C Chan.
13	NC		
14	A+5V	Output	Digital Supply
15	NC		

TABLA 2-5: ADVANTAGE 400 – Pines del conector ENC n

Para concluir la conexión se utilizó el conector X11 del controlador SEC-AC-305 cuyos pines se describen en la TABLA 2-6.

X11			
Pin	Symbol	Value	Specification
1	A	5V Ra $\approx$ 60 $\Omega$	Output signal tracer A
6	A/	5V Ra $\approx$ 60 $\Omega$	Output signal tracer A inverted
2	B	5V Ra $\approx$ 60 $\Omega$	Output signal tracer B
7	B/	5V Ra $\approx$ 60 $\Omega$	Output signal tracer B inverted
3	C	5V Ra $\approx$ 60 $\Omega$	Output signal tracer C
8	C/	5V Ra $\approx$ 60 $\Omega$	Output signal tracer C inverted
4	Scrhim	0 V	Screening / shield connection
9	GND	0 V	Digital earth / ground
5	+5V DC	+5V DC	Auxiliary voltage for external sensor (max 100 mA)

TABLA 2-6: SEC-AC-305 – Pines del controlador X11

Por lo tanto para cerrar el lazo de control con la posición angular de los motores se usaron los conectores ENC n y X11 conectando cada canal con el correspondiente en el otro conector. Esto se realizó en el conector ENC 1 y en el ENC 2 correspondientes al motor X y al motor Y respectivamente.

### Conexión de finales de carrera y sensores de posición Home

Para limitar el movimiento de los motores se instalaron dos sensores mecánicos de posición, uno correspondiente al final de carrera positivo y otro para el negativo. Estos sensores se conectaron directamente al controlador SEC-AC-305 a través de las entradas ubicadas en los pines 22 y 10 del conector X1 perteneciente al mencionado controlador. De esta manera, éste es el encargado de detener al motor cuando alcanza algunos de los límites de movimiento establecidos.

Por otro lado, se instaló un sensor mecánico de referencia denominado HOME utilizado para la rutina de posicionamiento inicial del motor. Este se conectó al puerto FLG1 del controlador ADVANTAGE 400 de acuerdo a la TABLA 2-7 mostrada a continuación.

FLG1			
Pin#	Symbol	Function	Description
1	USER1	Input	General Capture Flag **
2	PLIM1	Input	Positive Limit Flag **
3	MLIM1	Input	Negative Limit Flag **
4	HOME1	Input	Home Flag **
5	24VDC out		Field power supply 24 VDC

6	USER2	Input	General Capture Flag **
7	PLIM2	Input	Positive Limit Flag **
8	MLIM2	Input	Negative Limit Flag **
9	HOME2	Input	Home Flag **
10	24VDC out		Field power supply 24 VDC
11	USER3	Input	General Capture Flag **
12	PLIM3	Input	Positive Limit Flag **
13	MLIM3	Input	Negative Limit Flag **
14	HOME3	Input	Home Flag **
15	nc		Not connected
16	USER4	Input	General Capture Flag **
17	PLIM4	Input	Positive Limit Flag **
18	MLIM4	Input	Negative Limit Flag **
19	HOME4	Input	Home Flag **
20	GND out	Output	GND field power supply, flag ref
21	USER5	Input	General Capture Flag **
22	PLIM5	Input	Positive Limit Flag **
23	MLIM5	Input	Negative Limit Flag **
24	HOME5	Input	Home Flag **
25	GND out	Output	GND field power supply, flag ref

TABLA 2-7: ADVANTAGE 400 – Pines del controlador FLG1

Debemos tener en cuenta que todo lo anterior se realizó para cada motor. Usándose para el motor X la entrada denominada HOME1 y para el motor Y la entrada denominada HOME2.

Antes de ir a los conectores citados anteriormente, éstos se conectan a una bornera y de allí a los conectores finales. En la FIGURA 2-7 se muestra un esquema de la disposición de los sensores de final de carrera y home.

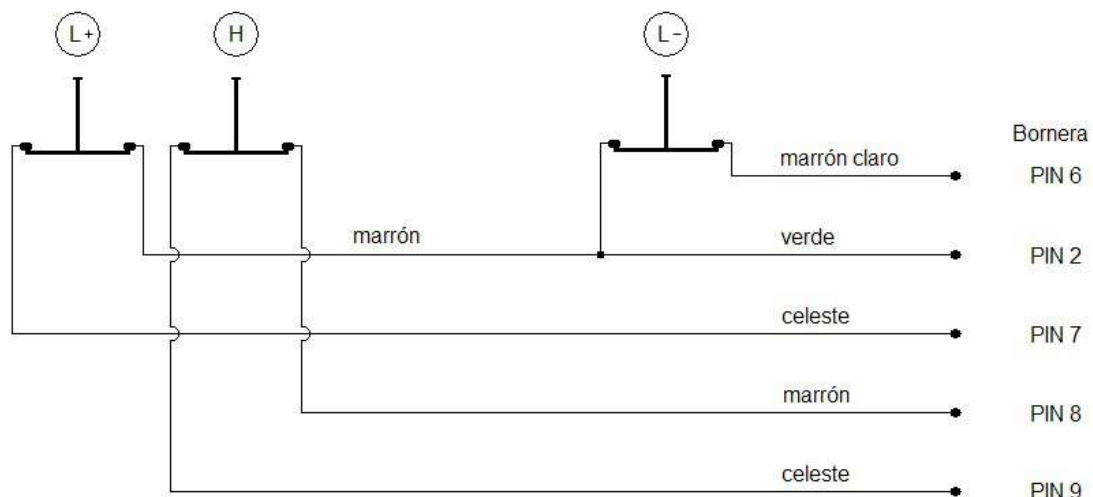


FIGURA 2-7: Finales de carrera y sensor de posición HOME

Por otro lado, en la TABLA 2-8 se detallan las distintas conexiones de las borneras para cada motor. Los pines de la bornera se enumeran de izquierda a derecha, viéndola de frente.

BORNERA		
Pin#	X	Y
1	Puesta a tierra	Puesta a tierra
2	Pin 18 del puerto X1 del driver SEC-AC-305 (+24 VDC)	Pin 18 del puerto X1 del driver SEC-AC-305 (+24 VDC)
3	Sin conexión	Sin conexión
4	Sin conexión	Sin conexión
5	Pin 9 del puerto X1 del driver SEC-AC-305 (ENA-CL)	Pin 9 del puerto X1 del driver SEC-AC-305 (ENA-CL)
6	Final de carrera negativo (ubicado al lado del motor)	Final de carrera negativo (ubicado al lado del motor)
7	Final de carrera positivo (ubicado al lado del home)	Final de carrera positivo (ubicado al lado del home)
8	Home (borne positivo)	Home (borne positivo)
9	Home (borne negativo)	Home (borne negativo)
10	Sin conexión	Sin conexión
11	Borne positivo de la fuente de alimentación de 24 VDC	Sin conexión
12	Masa de la fuente de alimentación de 24 VD	Sin conexión

TABLA 2-8: Descripción de borneras

Finalmente se detalla en la FIGURA 2-8 la disposición de los sensores HOME para los motores X e Y y la conexión a los pines del puerto FLG1 del controlador ADVANTAGE 400.

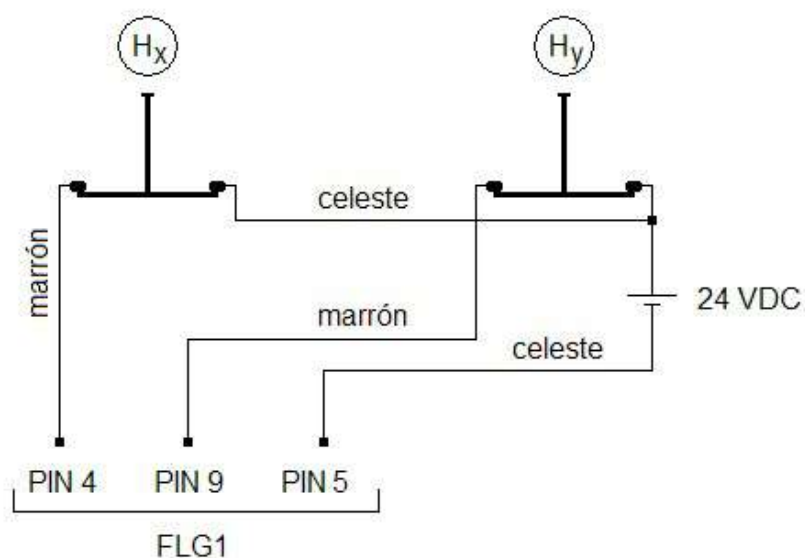


FIGURA 2-8: Sensores de posición HOME

### Conexión de los pulsadores de arranque y parada de emergencia

Estos pulsadores son los encargados de permitir o no el movimiento de los ejes. La función del pulsador de arranque es la de habilitar la etapa de potencia de los controladores de los motores, mientras que la función del pulsador de parada de emergencia maneja en forma asíncrona el movimiento de los motores, de tal manera que si la parada de emergencia está desactivada, los motores tienen la libertad de movimiento según la referencia que le envía el controlador ADVANTAGE 400; por otro lado, cuando la parada de emergencia se acciona, los controladores de los motores llevan su velocidad a cero, deteniéndose completamente el movimiento.

Para lograr que el pulsador de arranque habilite la etapa de potencia de los controladores se conectó a 24 VDC la entrada ubicada en el pin 21 (ENA-PWR) del conector X1 ubicado en el controlador SEC-AC-305, usándose para ello un contacto normal abierto del contactor, como puede observarse en la FIGURA 2-5.

Finalmente queda mencionar que el estado de funcionamiento del sistema se visualiza por medio de tres luces indicadoras. Una luz ámbar que se enciende cuando se da energía al sistema y que indica que todavía no se ha dado arranque mediante el pulsador de arranque, que acciona el contactor.

El estado del pulsador de parada de emergencia se visualiza por medio de una luz roja y otra verde, de tal manera que cuando la luz verde está encendida indica que los motores están en condiciones de moverse, y si la luz roja está encendida esto muestra que los motores no están habilitados para realizar algún movimiento.

La luz verde se conectó a 24 VDC por medio de un contactor normal cerrado de la parada de emergencia, mientras que la luz roja lo hace a través de un contacto normal abierto. En la FIGURA 2-5 pueden verse las citadas conexiones.

### **Interfase de comunicación**

La comunicación entre el controlador ADVANTAGE 400 y una pc externa se realiza a través del protocolo de comunicación RS232. Por medio de esta comunicación es posible realizar varias tareas como son la de sintonización PID, subida de parámetros al controlador, bajada de variables, etc.

Para la vinculación entre el controlador y la pc se utilizó un cable serial cuya configuración se describe en la FIGURA 2-9.



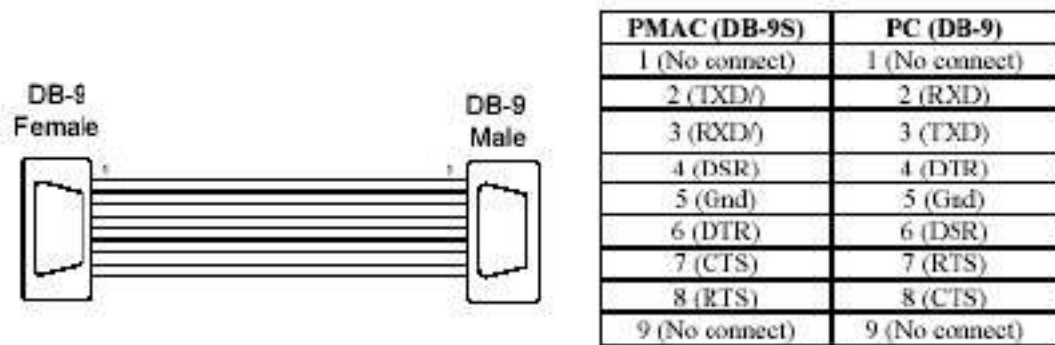


FIGURA 2-9: Conexiones RS232

Las diferentes conexiones se realizaron basadas en el manual de conexiones [6].

### MANEJO Y PROGRAMACIÓN INTERNA DEL CONTROLADOR

El panel frontal del controlador, el cual se muestra en la FIGURA 2-10, tiene las siguientes características. Los datos aquí presentados fueron extraídos del manual de uso [7]

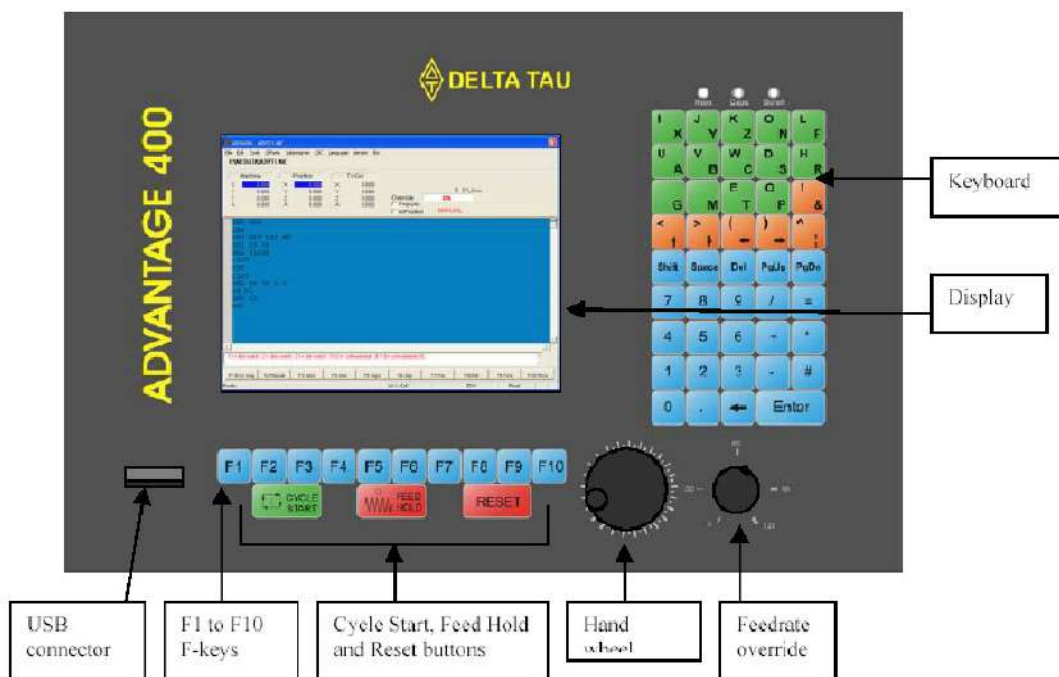


FIGURA 2-10: ADVANTAGE 400 - Panel del Controlador

- **Keyboard:** Teclado alfanumérico que contiene las teclas necesarias para controlar el software del Adv. 400 y para tipear los diferentes programas realizados en código G o programas PLC.

- **Display:** Pantalla flat que permite visualizar diferentes aspectos del controlador.
- **F1 to F10 F-keys:** estas teclas permiten un acceso sencillo al software del controlador, ejes de la máquina, edición de programas, etc.
- **Cycle Start, Feed Hold and Reset:** Estos botones son utilizados para controlar el inicio, parada y reinicio respectivamente, de un programa que esté cargado en el controlador.
- **Hand Wheel:** Para mover los ejes manualmente se puede utilizar el Hand Wheel. Por otro lado la perilla Feedrate Override está dividida en 4 cuadrantes y dependiendo en que cuadrante se encuentre, el movimiento del eje será de 0,001 o 0,01 o 0,1 o 0,2 milímetros por cada incremento de la perilla Hand Wheel. Utilizando la tecla F2 establecemos el modo manual y con la F4 seleccionamos el eje a mover.
- **Feedrate Override:** Permite ajustar en porcentaje la velocidad de avance programada desde 0 a 100 % en modo manual y desde 0 a 120 % en modo automático.
- **USB Connector:** Esta entrada admite la conexión de un dispositivo USB (teclado, mouse, etc).

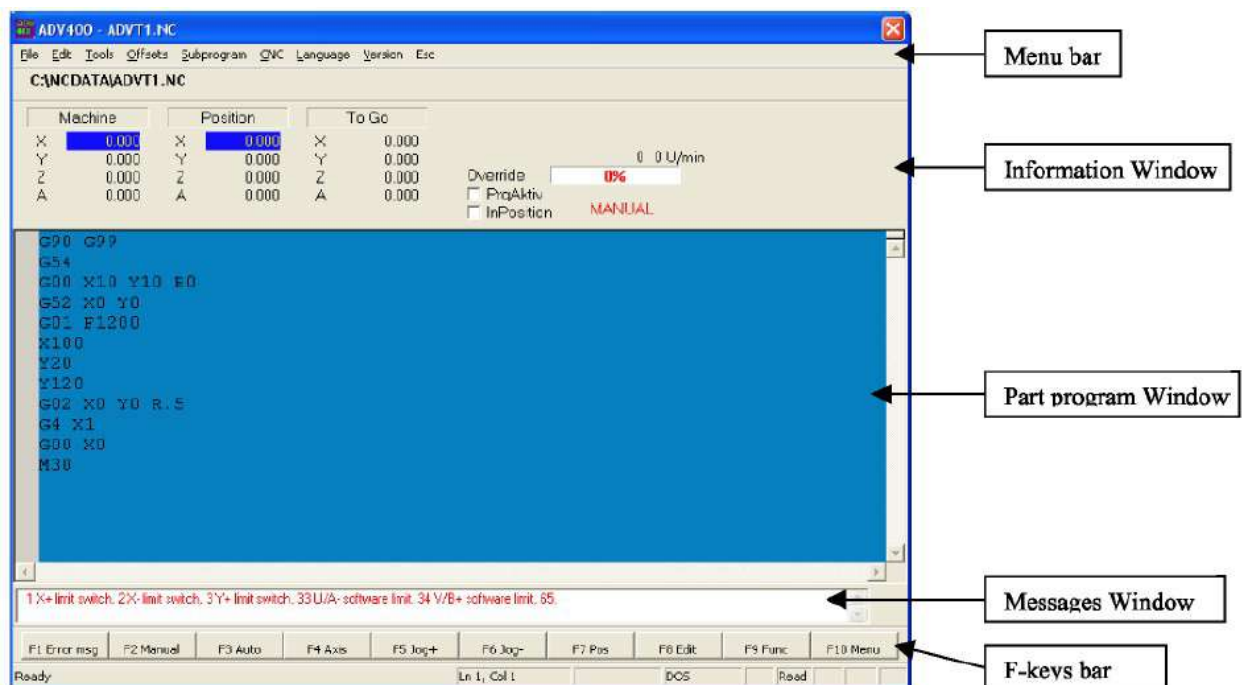


FIGURA 2-11: Interfaz del software ADV 400 NC

Al iniciar el controlador se carga el sistema operativo que posee como plataforma, para este controlador es una versión de Windows CE, el cual ejecuta como programa de inicio el software Adv 400 NC, cuya pantalla de inicio se muestra en la FIGURA 2-11.

Antes de poder realizar cualquier cambio o configuración en el sistema se debe definir el nivel de uso, el cual está protegido por una clave. Al iniciar el controlador por primera vez se solicita el ingreso de la clave, la cual definirá el nivel de manejo que podrá hacerse del controlador, según lo especificado en el manual de integración [8].

- **User Level:** para ingresar a este nivel no es necesario introducir una clave, sólo cliqueando en el botón OK o presionando la tecla F2 ya estará en el nivel de usuario. Este nivel permite mover los ejes manualmente, hacer la rutina de búsqueda de home y correr el programa presente.
- **Manager Level:** para ingresar al nivel de administrador se debe tipear la palabra clave **400USER**. En este nivel permite modificar el programa de movimiento cargado y administrar diferentes menus, teniendo restringido el acceso a algunos menus de configuración.
- **Integration Level:** para ingresar al nivel de integración se debe introducir la palabra clave **400MC**. En este nivel el acceso a todos los menus es completo y se puede realizar la integración de la máquina.

La FIGURA 2-11 muestra las distintas partes que conforman la interfaz del software, estas se describen brevemente a continuación.

- **Menu Bar:** en la barra de menú se encuentran todos los accesos a las diferentes partes del programa. En la TABLA 2-9 se presenta una descripción rápida de estos accesos.

Menu Bar	
Item	Descripción
File	Gestiona el programa de movimiento, permitiendo crear, abrir y salvar.
Edit	Provee las herramientas necesarias para modificar un programa.
Tools	Abre el administrador de herramientas.
Offsets	Accede a los offsets de trabajo, permite setear la posición de cada eje y el manejo de las variables P.
Subprograms	Permite crear, editar, borrar, cargar y descargar subprogramas.
CNC	Permite acceder a las diferentes herramientas para realizar la integración.

Language	Cambia el lenguaje del software.
Version	Provee información del sistema.
Esc	No tiene una función.

**TABLA 2-9:** Descripción de la barra de menú

- **Information Window:** provee información de la posición de los distintos ejes, porcentaje de la velocidad de avance, estado del sistema (manual, automático, home, etc) y el estado de ejecución del programa de movimiento.
- **Part Program Window:** contiene el programa de movimiento cargado, listo para ser ejecutado, editado, etc.
- **Messages Window:** provee información de errores, alertas, etc.
- **F-Keys Bar:** teclas de acceso directo a distintas funciones del software. En la TABLA 2-10 se muestra una descripción rápida de estas funciones.

<b>F-Keys</b>	
<b>Tecla</b>	<b>Descripción</b>
F1	Abre una ventana de ayuda donde se encuentran los mensajes de errores.
F2	Setea al sistema en modo manual, y en este modo los ejes se pueden seleccionar usando la tecla F4 y mover usando las teclas F5 y F6. También en este modo con F8 se accede a la parte de creación, edición y modificación de un programa de movimiento.
F3	Setea al sistema en modo automático. En este modo se puede correr un programa de movimiento que esté cargado, utilizando las teclas Cycle Start, Feed Hold y Reset.
F4	Permite seleccionar los ejes. En modo manual permite seleccionar un eje y moverlo usando las teclas F5 y F6. En modo automático permite seleccionar el eje al cual se le hará la rutina de homing usando las teclas F5 o F6.
F5	Estando el sistema en modo manual, mueve un eje en la dirección positiva. En modo automático corre la rutina de búsqueda del home para el eje previamente seleccionado.
F6	Estando el sistema en modo manual, mueve un eje en la dirección negativa. En modo automático corre la rutina de búsqueda del home para el eje previamente seleccionado.
F7	Permite cambiar el tipo de información mostrada, entre una información completa o mostrar solamente la posición de los ejes.
F8	Estando en modo manual, permite ingresar al modo edición de un programa de movimiento.
F9	Muestra un submenú de teclas, entre las cuales figuran F1, F2 y F10, para acceder a funciones de edición rápida, búsqueda de home y salida del submenú, respectivamente.
F10	Permite acceder al menú bar.

**TABLA 2-10:** Teclas de función

## Configuración interna

Antes de usar los ejes se configuró el sistema, para ello se llevaron a cabo 4 pasos, los cuales se describen a continuación.

### 1. Configuración general de ejes – 1º parte:

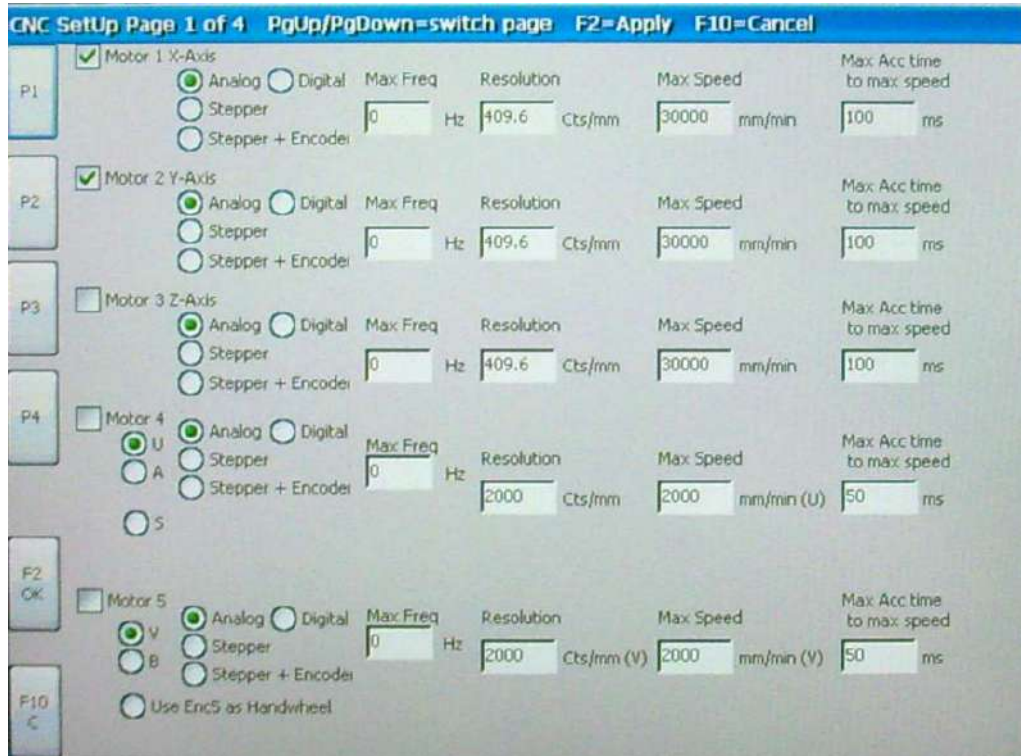


FIGURA 2-12: Configuración – Paso 1

En este primer paso de configuración se definió la cantidad de motores activos, para nuestro caso son dos, motor 1 y motor 2 correspondiente al eje X e Y respectivamente. Dado que el sistema posee servomotores sin escobillas se seleccionó la opción “Analog”. Con respecto al ítem “Max Freq” este valor no se configuró ya que sólo es necesario definirlo cuando el tipo de motor seleccionado es del tipo paso a paso (stepper). La resolución del encoder incremental es de  $1024 \times 4 = 4096$  pulsos o cuentas por revolución. Dado que por cada revolución el avance lineal es de 10 mm tenemos que la resolución expresada en cuentas por milímetros es:

$$4096 \frac{cts}{rev} \times \frac{1 rev}{10 mm} = 409,6 \frac{cts}{mm}$$

Con respecto a la máxima velocidad, se consideró una velocidad de 3000 rpm. Teniendo nuevamente en cuenta el paso del tornillo de 10 mm tenemos que:

$$3000 \frac{rev}{min} \times 10 \frac{mm}{rev} = 30000 \frac{mm}{min}$$

Finalmente resta calcular el tiempo para llegar de 0 a la velocidad máxima. Para calcular este valor, se supuso una aceleración de 0,5g. De lo cual obtenemos que:

$$t = \frac{v_M}{a} = \frac{30000 \frac{mm}{min}}{0.5 \times 9.81 \frac{m}{seg^2}} = 101,9 \text{ mseg}$$

Por lo tanto se estableció como tiempo un valor de 100 mseg. Y con esto completamos el primer paso de la configuración, como se puede apreciar en la FIGURA 2-12.

## 2. Configuración general de ejes – 2º parte:

En esta etapa primero se configuró la señal de error del amplificador, el cual es un elemento de seguridad, ya que si algún motor falla, el controlador lo detecta y da aviso al sistema. Para nuestro caso hemos seleccionado la opción “High True” lo que significa que cuando tengamos un nivel bajo el sistema nos avisará que el motor está fallando.

Lo siguiente que se configuró fueron los límites por hardware. El controlador ADVANTAGE 400 posee entradas para controlar los límites de carrera, pero en nuestro sistema los límites de carrera fueron conectados a los controladores SEC-AC-305 los cuales se encargan de realizar el monitoreo de estos finales de carrera. Por lo tanto se seleccionó la opción “Disable” deshabilitando esta alternativa de monitoreo que nos proporciona el controlador ADVANTAGE 400.

Así como puede hacer un monitoreo por hardware de los finales de carrera, también se puede limitar el movimiento por software, definiendo valores de distancia a recorrer en un sentido y otro expresadas en mm. También esta opción fue deshabilitada por las razones expresadas anteriormente. Con solo ingresar un valor nulo de posición queda desactivada esta opción.

Luego se definió la máxima velocidad con la que se puede mover alguno de los motores utilizando las perillas de mano ubicadas en el panel frontal del controlador ADVANTAGE 400. Se fijó un valor de velocidad máxima de  $3000 \frac{mm}{min}$ .

Finalmente se deseleccionó la casilla “Motor 1 y 2 with Brake” para indicar que los motores no poseen freno interno.

En la FIGURA 2-13 se puede apreciar cómo quedó configurada esta segunda etapa.

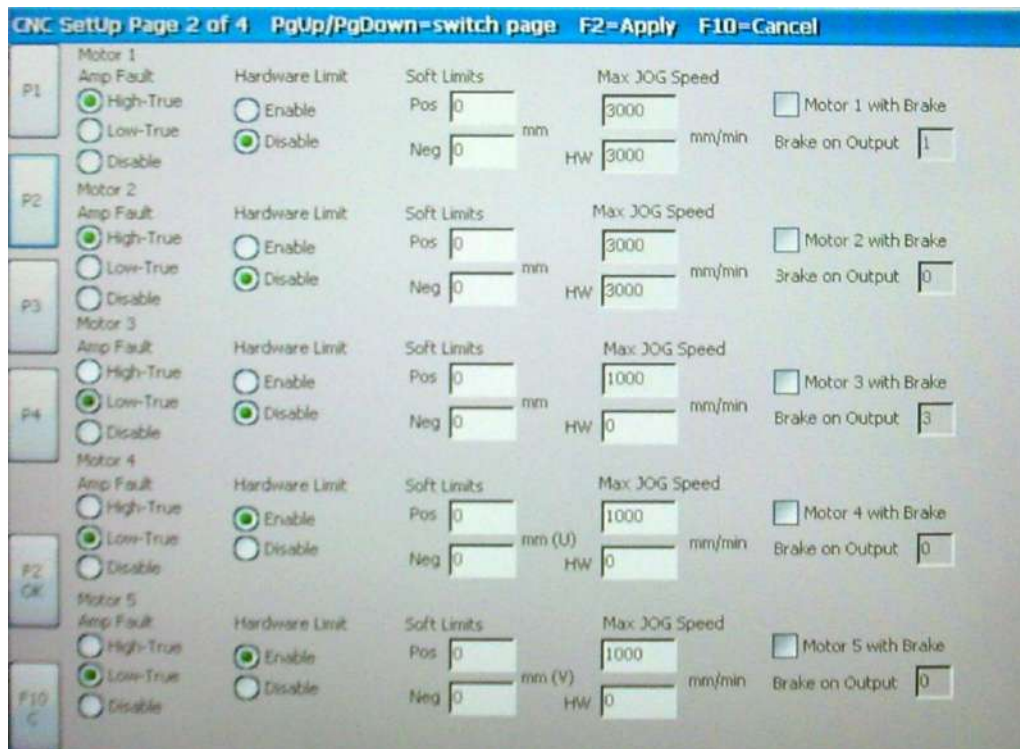


FIGURA 2-13: Configuración – Paso 2

### 3. Configuración de los ejes para la búsqueda del home:

En esta sección se configuró todo lo concerniente a la búsqueda del home. Dado que nuestra intención es que el sistema pueda buscar el home y que lo haga utilizando tanto el sensor mecánico de posición y el canal C del encoder incremental, dejamos las primeras tres opciones (**No Home**, **Absolut pos** y **Only C ch**) sin tildar.

Para que el controlador determine cuándo ha activado el sensor mecánico de posición HOME y el pulso del canal C del encoder incremental, debemos definir el estado de estas señales. Para ello se seleccionó para ambos casos la opción “High True”, lo cual significa que ante una señal baja el sistema a detectar que ha llegado a la posición HOME.

Respecto de la velocidad con que debe realizar la búsqueda del home, ésta se fijó en un valor de  $500 \frac{mm}{min}$ , valor suficientemente pequeño para que la búsqueda se realice sin dificultad.

Finalmente se definió para esta tercera etapa el “Home seq” que es la secuencia con que el sistema empezará a buscar el home para cada uno de los motores. En este caso se configuró para que comience la búsqueda del HOME del motor 1 y luego el del motor 2, correspondientes al eje X y al eje Y, respectivamente.

Nuevamente todo lo expresado anteriormente se puede visualizar en la FIGURA 2-14, mostrada a continuación.

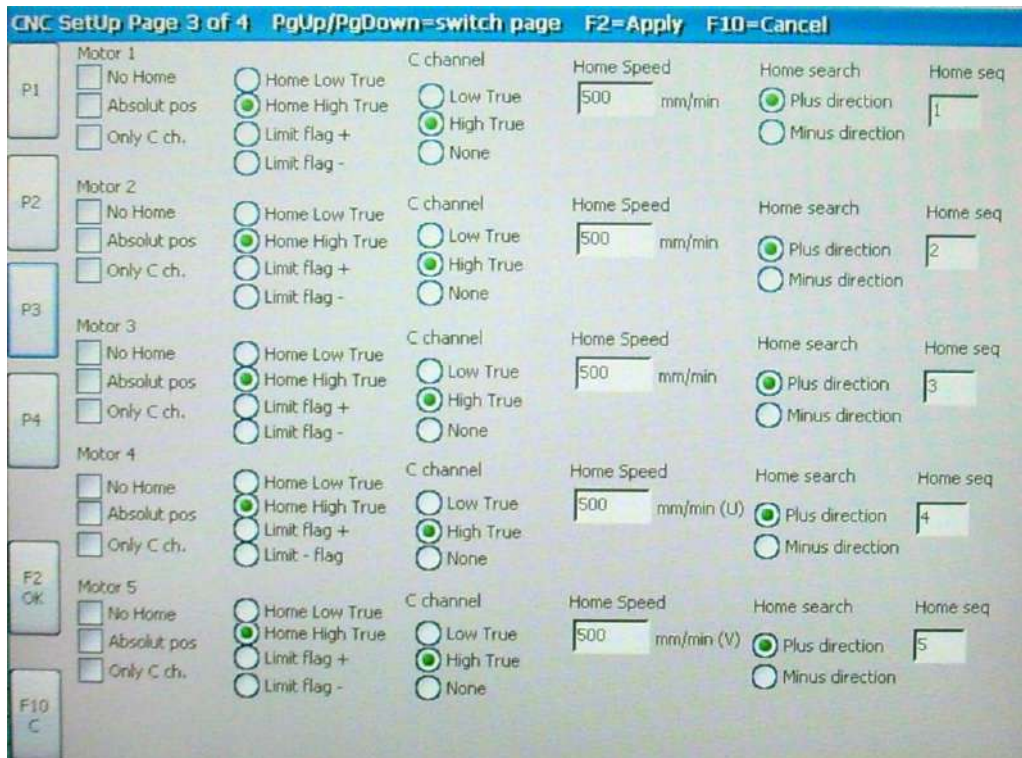


FIGURA 2-14: Configuración – Paso 3

#### 4. Configuración de las misceláneas:

En esta última etapa de esta configuración se definió el máximo error de seguimiento, estableciéndose un valor de 1 mm, para lo cual superado este valor el sistema enviará un mensaje advirtiendo el evento ocurrido, para que se puedan realizar las correcciones pertinentes.

Tanto para el motor 1 como para el motor 2 se tildó la opción “Reverse Counting direction” necesaria para que la dirección de conteo del encoder coincida con el comando analógico de salida del correspondiente motor.

Las demás opciones se dejaron como estaban por defecto, considerándose no necesaria su modificación. En la FIGURA 2-15 puede visualizarse lo expresado anteriormente.



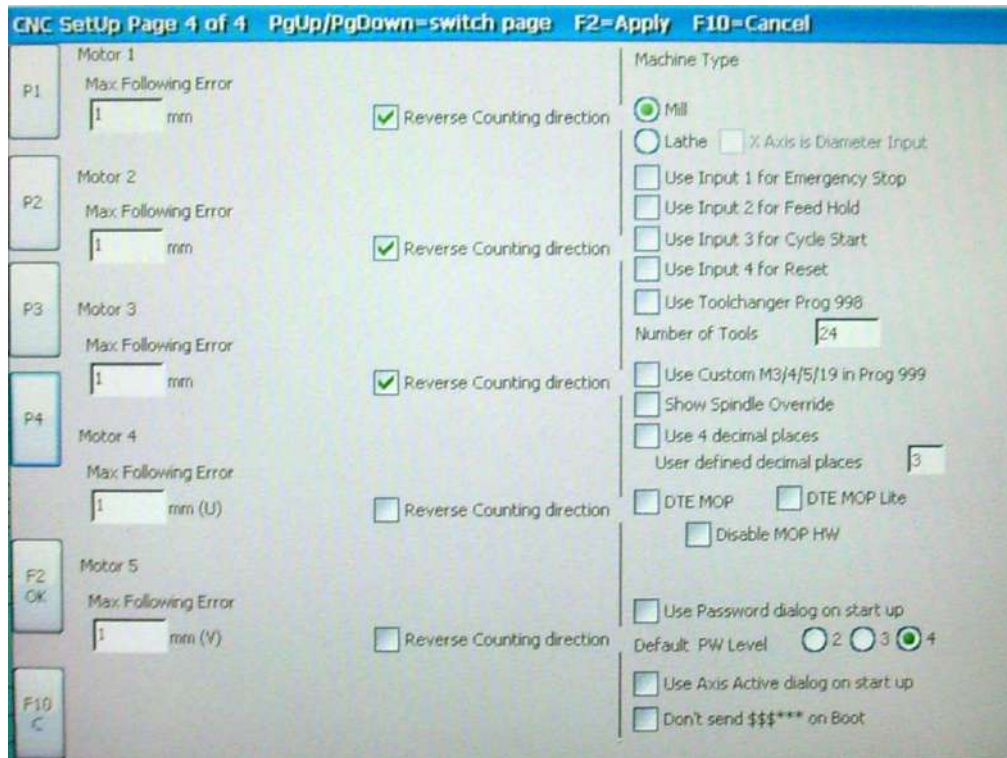


FIGURA 2-15: Configuración – Paso 4

Con esto se dio por concluida la etapa de configuración interna del sistema.

## **CAPÍTULO 3: MONTAJE DE LA ESCALA LINEAL**

### **INTRODUCCIÓN**

Los encoders lineales pueden ser usados en casi cualquier aplicación. Estos son ideales para máquinas y otros equipamientos cuyos ejes de alimentación se encuentren en un lazo cerrado, tales como máquinas de fresado, centros de maquinado, tornos, etc.

El beneficio del comportamiento dinámico de los encoders lineales, su velocidad de desplazamiento de gran fiabilidad, y su aceleración en la dirección de medición, hacen que estos sean muy convenientes para medición de ejes de alta dinámica.

Son muchas las ventajas que poseen esta clase de encoders, tales como medir la posición de un eje sin elementos mecánicos de transferencia adicionales. Los errores de transferencia desde la mecánica pueden ser detectados por el encoder y corregidos por medio de su electrónica de control. Este puede eliminar un número de fuentes potenciales de error, tales como:

- Error de posición debido al comportamiento térmico del tornillo de bolas recirculante.
- Histéresis.
- Error cinemático a través del error de paso del tornillo de bolas.

### **Diseño mecánico**

Los encoders lineales para máquinas herramientas de control numérico son encoders sellados. Por medio de una carcasa de aluminio se protege a la escala, la cabeza de lectura y el carril-guía de virutas, de polvo y de fluidos. Finalmente un labio de cierre sella la carcasa.

La cabeza de lectura viaja en una guía de baja fricción con la unidad de medición. Un acoplamiento conecta la cabeza de lectura con el bloque de montaje y compensa el desajuste entre la escala y las guías de la máquina.

Dependiendo del modelo de escala se permiten desplazamientos laterales y axiales de  $\pm 0,2$  a  $\pm 0,3mm$ .

### **Comportamiento térmico**

La combinación de procesos de mecanizado cada vez más rápidos y con máquinas completamente cerradas conduce a incrementar la temperatura del ambiente en que las máquinas trabajan. Por lo tanto es cada vez más importante el

comportamiento térmico de los encoders lineales a utilizar, ya que es esencial para la exactitud de trabajo de las máquinas.

Como regla general el comportamiento térmico de los encoders lineales debería coincidir con el de la pieza de trabajo u objeto medido. Durante los cambios de temperatura, el encoder lineal debe ser capaz de expandirse y contraerse de una manera definida y calculable.

### Comportamiento dinámico

El constante incremento en eficiencia y rendimiento de las máquinas herramientas requieren cada vez más altas velocidades y aceleraciones, al mismo tiempo que debe ser mantenida la precisión en el mecanizado.

Una característica importante es la rigidez en la dirección de medición, para garantizar precisión de desplazamiento de la máquina herramienta. La baja masa de los componentes contribuye a un comportamiento dinámico excelente.

En la FIGURA 3-1 se presenta un diseño esquemático de un encoder lineal.

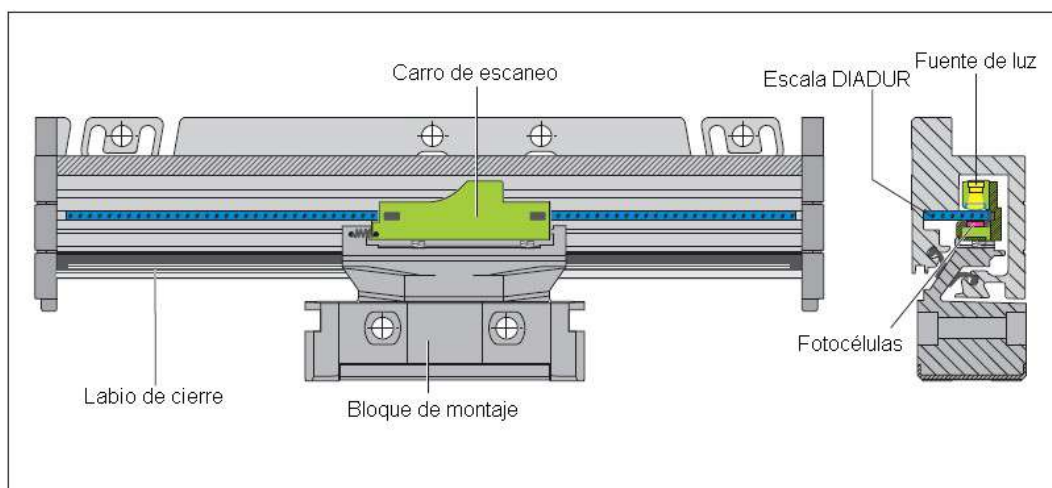


FIGURA 3-1: Diseño esquemático de un encoder lineal

Finalmente todas estas particularidades que poseen los encoders lineales hacen pensar seriamente la inclusión de los mismos para realizar mediciones o para formar parte de un sistema de control; aún teniendo en cuenta que los costos de estos dispositivos son superiores a la de otros sistemas de medición.

### SELECCIÓN

Existen muchas variables a considerar al momento de seleccionar una escala lineal, pero como ésta va a estar destinada a medir la posición de un sistema de alta

velocidad son dos especificaciones las que se tuvieron en cuenta para realizar la elección, las cuales son la resolución y la precisión.

Considerando las distintas empresas que ofrecen reglas lineales se analizaron dos productos, uno de la empresa FAGOR y otro correspondiente a HEIDENHAIN. Teniendo en cuenta la similitud de los productos de ambas empresas, se optó por elegir la escala lineal de la marca HEIDENHAIN por contar ésta con mayor trayectoria y mejor asesoramiento.

En la TABLA 3-1 se muestran las características de la escala lineal seleccionada.

<b>Especificaciones</b>	
<b>Modelo</b>	<i>LS177</i>
<b>Medición estándar</b>	Escala de vidrio con graduación DIADUR*
<b>Coefficiente de expansión</b>	$\alpha_{\text{térmico}} = 8 \times 10^{-6} K^{-1}$
<b>Grado de precisión</b>	$\pm 5 \mu m$
<b>Longitud de medición</b>	<i>740 mm</i>
<b>Señales incrementales</b>	<i>TTL x 20</i>
<b>Período de rejilla</b>	<i>20 <math>\mu m</math></i>
<b>Interpolación integrada</b>	<i>20 – fold</i>
<b>Período de la señal</b>	<i>1 <math>\mu m</math></i>
<b>Frecuencia de barrido</b>	<i>25 kHz</i>
<b>Borde de separación</b>	$\geq 0.5 \mu s$
<b>Resolución</b>	<i>0,25 <math>\mu m</math></i>
<b>Velocidad de avance</b>	$\leq 30 \frac{m}{min}$
<b>Suministro de energía sin carga</b>	<i>5V <math>\pm</math> 5% / 140 mA</i>
<b>Largo del cable</b>	$\leq 100 m$
<b>Fuerza de movimiento requerida</b>	$\leq 4 N$
<b>Vibración (55 a 2000 Hz)</b>	$\leq 200 \frac{m}{seg^2}$
<b>Shock (11 mseg)</b>	$\leq 400 \frac{m}{seg^2}$
<b>Aceleración</b>	$\leq 60 \frac{m}{seg^2}$ en la dirección de medición
<b>Temperatura de operación</b>	<i>0° C a 50° C</i>
<b>Protección IEC 60529</b>	<i>IP53</i>
<b>Peso</b>	<i>2,1 Kg</i>

TABLA 3-1: Especificaciones de la escala lineal

## MONTAJE

### Escala lineal HEIDENHAIN

Para montar la escala lineal, la cual se muestra en la FIGURA 3-2, se siguió el procedimiento indicado por el fabricante en el manual de montaje [12].



FIGURA 3-2: Escala lineal HEIDENHAIN

Antes de proceder a efectuar a la instalación de la escala se tuvo que desmontar la Mesa X que se encontraba montada en cruz con la Mesa Y. Una vez finalizado el desacople de las mesas, quedó lista (FIGURA 3-3) para comenzar con los primeros pasos de la fijación de la regla.



FIGURA 3-3: Mesa desmontada

Tal como muestra la FIGURA 3-4, el primer requisito para la instalación de la escala lineal fue la planicidad de la superficie donde se fijó la escala. La misma debía cumplir con un valor  $\leq 30 \mu m$ , según lo especificado en el manual de montaje de la mencionada escala lineal. Tal requisito fue un requerimiento de diseño especificado en los planos de fabricación que se le entregaron a la empresa INMEBA.SRL encargada de fabricar la mesa y quedó registrada en el informe 069/08 entregado por el Inspector L. Sosa perteneciente a la empresa mencionada.

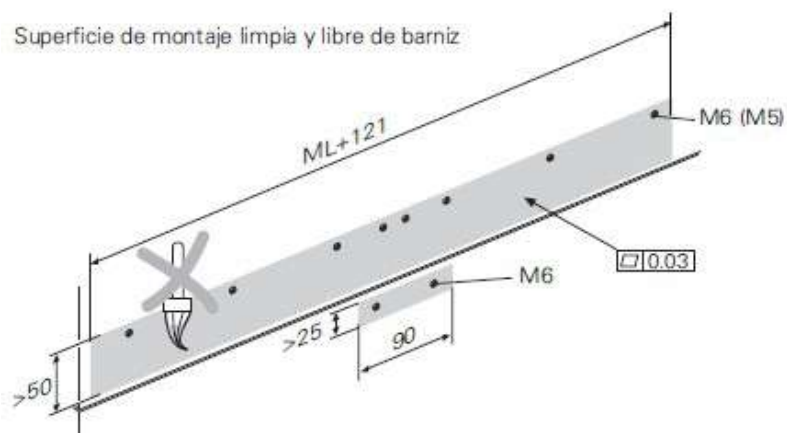


FIGURA 3-4: Planicidad de la superficie de instalación

Una vez finalizado los trabajos de limpieza de la cara de la base donde se montará la escala lineal, se marcaron los distintos puntos de anclaje, donde luego se realizaron los agujeros, y posteriormente, con un macho M4, se hicieron las roscas.

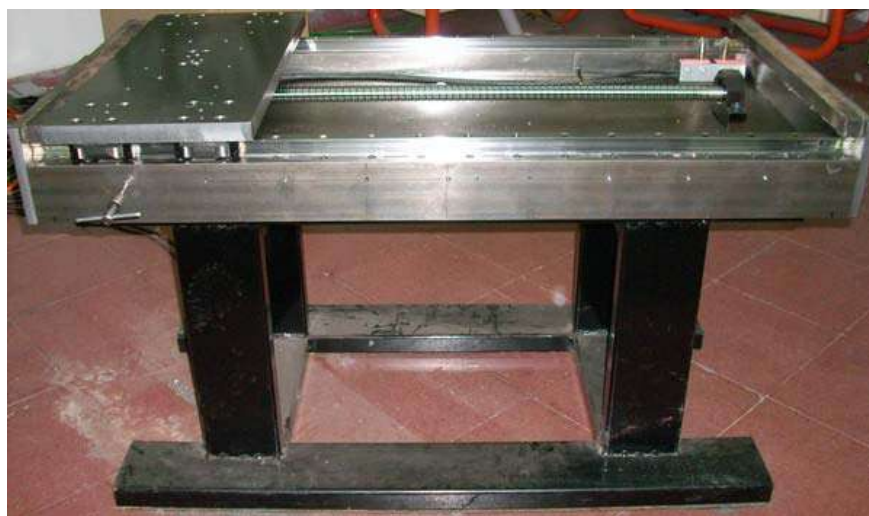


FIGURA 3-5: Puntos de fijación de la escala lineal

La posición de estos puntos de anclaje se fijaron basándose en el plano “Agujeros para Regla Y” el cual se adjunta en el APÉNDICE A. Una vez finalizados los 10 agujeros roscados, como se muestra en la FIGURA 3-5, se procedió a fijar los primeros tornillos.

Para fijar la escala lineal teníamos dos opciones, usar tornillos M5 o M6. Con el propósito de tener un mayor margen de movimiento para la regulación se utilizaron los tornillos M5. Como prueba inicial se colocaron dos de estos tornillos en los extremos de la escala lineal, ajustándose los mismos con un torquímetro a un valor inicial de 1 Nm, tal como se muestra en la FIGURA 3-6.

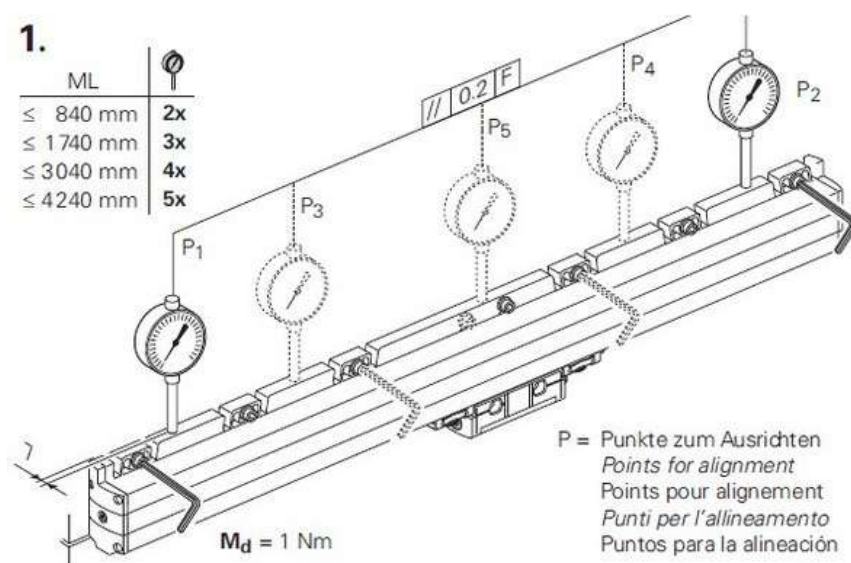


FIGURA 3-6: Puntos de alineación genéricos

Con el comparador se midió la alineación en varios puntos a lo largo de la escala, según se especificaba en el manual de montaje; luego de obtener valores razonables se procedió a ajustar los 8 restantes tornillos con el mismo torque inicial de 1 Nm. Nuevamente con la ayuda del comparador se midieron los puntos de alineación, encontrándose pequeñas diferencias respecto a la primera medición. Por lo cual se procedió a dar el torque final de 5 Nm, y la consiguiente verificación final de la alineación.

Se debe mencionar que para realizar las mediciones con el comparador se debió situar a éste sobre el plato de Mesa Y, cuyos patines están apoyados sobre unas guías, las cuales son la cara de referencia, para luego moverlo a los distintos puntos de alineación por medio de una manivela colocada en el acople que vincula al tornillo con el eje del servomotor.

Para asegurar la calidad de las mediciones se recorrieron los puntos de medición en un sentido y en el inverso, pero dado que no se podía llegar de un extremo de la escala al otro se cambió la posición del comparador (FIGURA 3-7) y se realizó el mismo procedimiento, pero comenzando desde la otra punta de la escala, y luego se compusieron estas mediciones.

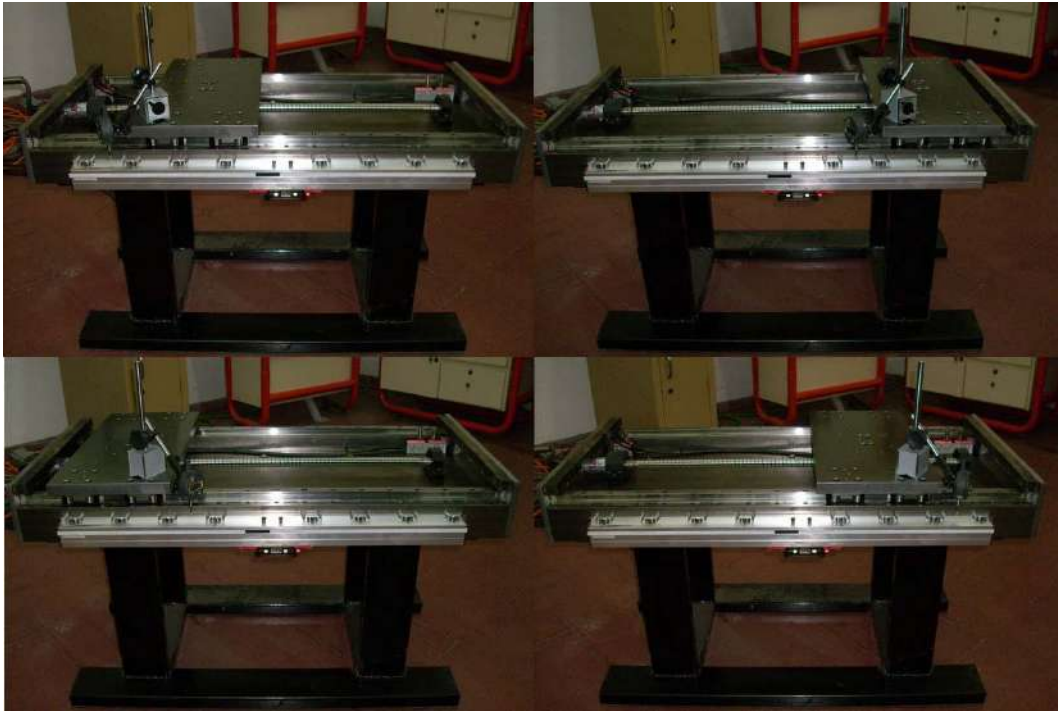


FIGURA 3-7: Posiciones del comparador

En la TABLA 3-2 se muestran los valores finales recolectados y en la FIGURA 3-8 una gráfica en la que se puede ver las variaciones de los valores medidos. El primer valor es de  $0 \mu m$  y corresponde al valor inicial del comparador.

Ubicación comparador	Punto de medición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Valor pico
Extremo izquierdo	Sentido directo	0	1	6	26	28	33	67	75	82	114	117	119	120						120
	Sentido inverso	1	4	10	31	29	38	72	77	87	118	123	124	120						124
	Valor medio	0,5	2,5	8	28,5	28,5	35,5	69,5	76	84,5	116	120	121,5	120						121,5
Extremo derecho	Sentido directo						26	29	30	31	28	26	22	2	1	0	-4	-4	0	31
	Sentido inverso						26	30	33	30	31	30	27	5	5	4	-2	-3	-2	33
	Valor medio						26	29,5	31,5	30,5	29,5	28	24,5	3,5	3	2	-3	-3,5	-1	31,5

TABLA 3-5: Medición final de la alineación



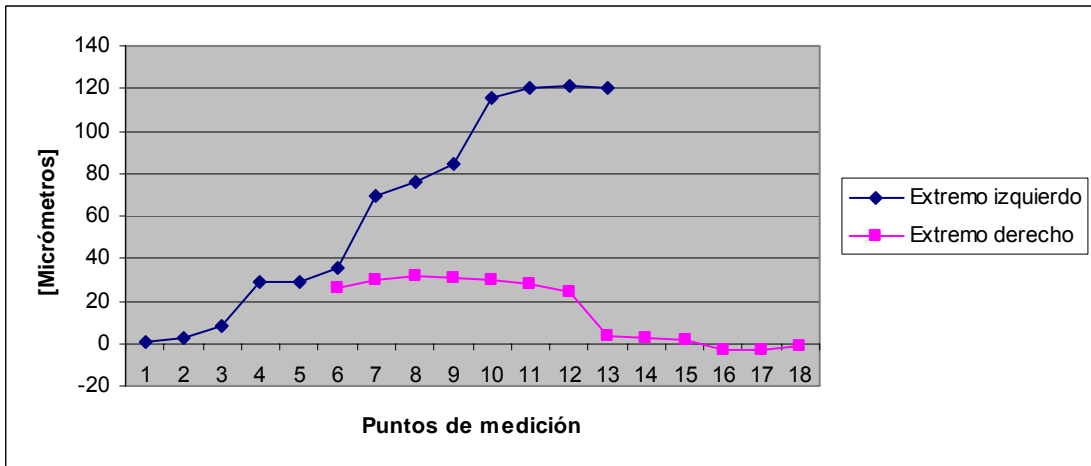


FIGURA 3-8: Medición final de la alineación

Para este caso el manual de montaje solicitaba que la alineación no debía superar los  $200 \mu\text{m}$ , dicha especificación se muestra en la FIGURA 3-9, y como puede observarse se cumple la mencionada condición, ya que la máxima desviación medida es de  $\leq 124 \mu\text{m}$ .

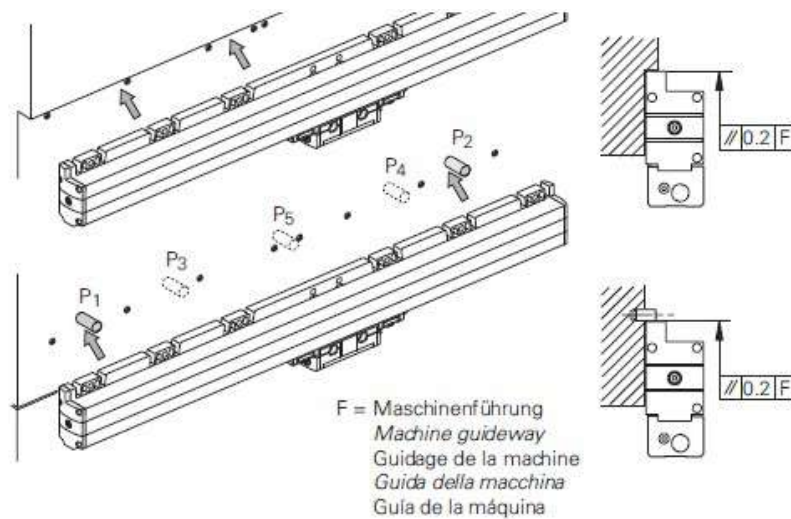


FIGURA 3-9: Alineación de la escala lineal

### Soportes de fijación

Para vincular la mesa de posición denominada “MESA Y” con la escala lineal se encargó la fabricación de un conjunto de dos piezas las cuales se muestran en la FIGURA 3-10 y cuyos planos “Soporte Móvil Y” y “Soporte Fijo Y” se presentan en el APÉNDICE A. Las mismas fueron fabricadas en aluminio de tal manera que el conjunto

fuese lo más liviano posible, y por otro lado que el costo de fabricación también fuese lo menor posible.



FIGURA 3-10: Soportes de fijación

Para fijar estos soportes al plato de la “Mesa Y” se debió perforar y luego roscar en las posiciones que se especifican en el plano “PLATO EJE Y”, el cual se adjunta en el APÉNDICE A. Por medio de dos tornillos M6 y con un torque inicial de 1 Nm se fijaron ambos soportes quedando estos vinculados al plato como se observa en la FIGURA 3-11.



FIGURA 3-11: Vinculación plato-soportes

Utilizando el comparador, galgas de calibración y bloques patrones se reguló la posición de estas placas soportes, de manera tal de cumplir con los requerimientos de paralelismo indicados en el manual de montaje de la escala lineal. Cumplidos estos requerimientos se procedió a dar el torque final de 5 Nm a los tornillos de sujeción entre los soportes y el plato.

La distancia de separación entre la cara interna del soporte fijo y la cara de apoyo de la escala lineal debía ser de  $37 \pm 0,3 \text{ mm}$ , tal como se muestra en la FIGURA 3-12.

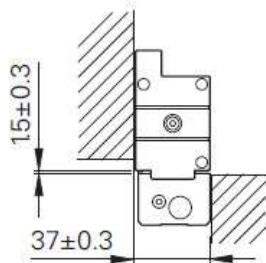


FIGURA 3-12: Distancia de separación del cabezal

Para realizar esta medición se dividió el recorrido total de la mesa Y en 4 partes distanciadas 250 mm, y con la ayuda de un calibre digital y bloques patrones se recolectaron los valores que muestran la TABLA 3-6, de los cuales se observa que se cumple con el requisito mencionado, en el cual esta distancia no podía ser mayor a 37,3 mm ni menor a 36,7 mm.

Valores expresados en <i>mm</i>								
Punto de medición	$P_1$		$P_2$		$P_3$		$P_4$	
Punto de medición en el soporte fijo	Izda.	Dcha.	Izda.	Dcha.	Izda.	Dcha.	Izda.	Dcha.
	36,92	36,90	37,00	37,01	36,96	36,94	36,98	36,96

TABLA 3-6: Separación del bloque de montaje

Finalmente se verificó con el comparador que el soporte fijo presentara la menor desviación en forma horizontal, de tal manera de impedir que el desplazamiento del bloque de montaje se hiciera inclinado

Esta última verificación fue importante dado que respetando este valor se garantizó que el desplazamiento del bloque de montaje se efectuara con la menor fricción posible.

Con respecto al bloque de montaje, éste debía cumplir con ciertas condiciones en cuanto a su posición, para lo cual se aconsejaba utilizar una herramienta de calibración; al no contar con esta herramienta se utilizó para calibrar la posición del

cabezal los distanciadores que sujetaban al mismo. Con esta herramienta y con los bloques patrones se ajustó la posición del cabezal y se vinculó a la placa soporte por medio de dos tornillos M6, lo cuales se fijaron con un torque final de 8 Nm. Una vez montado todos los soportes se verificaron las distancias mencionadas, y que pueden observarse en la FIGURA 3-13, con la ayuda de galgas y bloques patrones, además de un calibre digital.

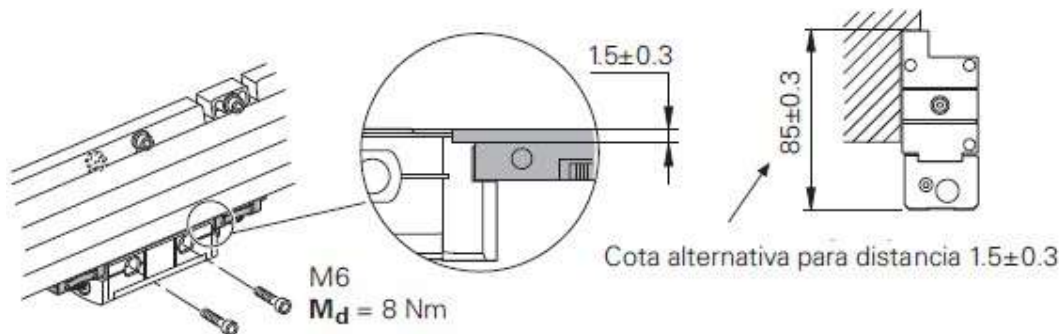


FIGURA 3-13: Calibración del cabezal

El bloque de montaje no sólo debía cumplir con requisitos de orientación en su posición, sino también de recorrido a lo largo de la escala. Para que se cumplieran estas limitaciones en cuanto a su desplazamiento se ajustaron los finales de carrera como así también los topes de goma que se encuentran en los extremos de la mesa. Con lo cual se logró respetar los valores que se muestran en la FIGURA 3-14, de manera tal de garantizar el normal funcionamiento de la escala.

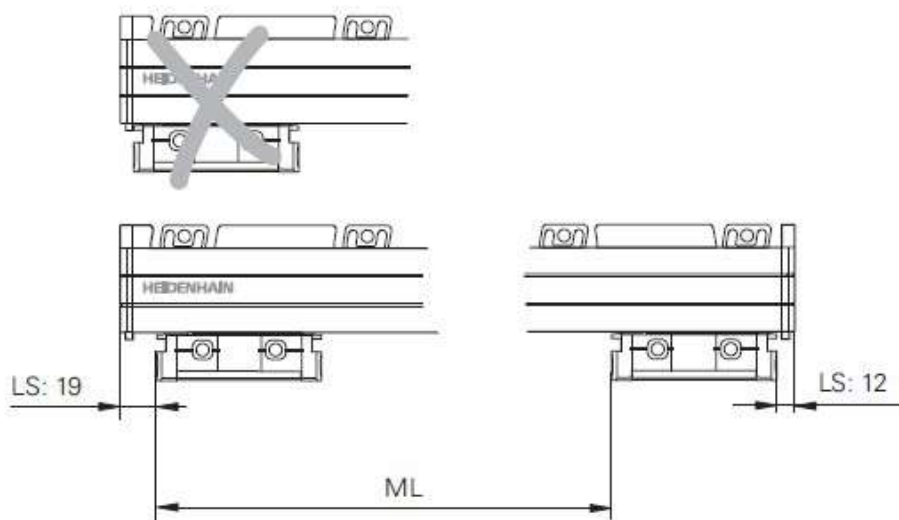


FIGURA 3-14: Desplazamiento del cabezal

## ELEMENTOS DE CONEXIÓN Y CABLES

La conexión de la escala lineal con el puerto “ENC2” del controlador ADVANTAGE 400 se realizó a través de un cable cuyos pines de conexión se indican en la TABLA 3-8.

LS177C			Adv400 [ENC2]	
Pin	Descripción	Color	Pin	Descripción
5	$U_{a1}$	Brown	1	CHA1+
6	$\overline{U}_{a1}$	Green	9	CHA1-
8	$U_{a2}$	Gray	10	CHB1+
1	$\overline{U}_{a2}$	Pink	3	CHB1-
3	$U_{a0}$	Red	4	CHC1+
4	$\overline{U}_{a0}$	Black	12	CHC1-
12	$U_p$	Brown/Green	5	A+5V
10	0V	White/Green	2	GND

TABLA 3-8: Disposición de pines

Debido a la distancia entre el controlador y la mesa de posición donde está montada la escala lineal se tuvo que adquirir un cable adaptador, en donde uno de los extremos posee un conector de fábrica y en el otro extremo se colocó una ficha DB 15 macho, la cual va inserta en el puerto del controlador ADVANTAGE 400.

La conexión de este cable adaptador se realizó según lo especificado en el manual de instrucciones de montaje provisto por el fabricante. En la FIGURA 3-15 se muestra el diagrama de conexiones que se utilizó para armar el mencionado cable alargador.

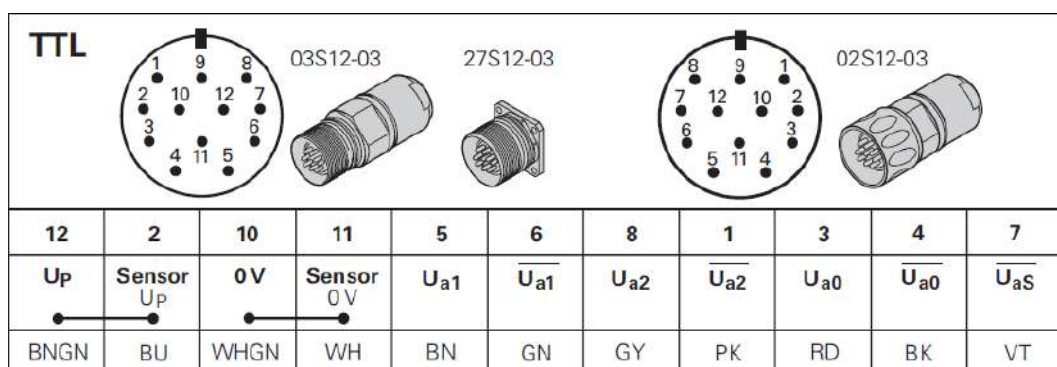


FIGURA 3-15: Diagrama de conexión del cable adaptador

Finalmente se conectó el cable a la escala lineal y se volvió a ensamblar la Mesa X, la cual se había desacoplado para realizar el proceso de montaje. También se

volvieron a verificar los requisitos de ensamblaje para conocer si se habían modificado estos valores producto del acoplamiento de la Mesa X, no encontrándose modificación de esto. Así quedó concluida la instalación de la regla, como puede observarse en la FIGURA 3-16.



FIGURA 3-16: Montaje final

## CAPÍTULO 4: PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA

### SOFTWARE DE CONTROL

Para configurar y controlar la placa Turbo PMAC2 se utilizó el programa denominado PWIN32PRO2, el cual es una herramienta de desarrollo para crear y administrar las implementaciones específicas de la mencionada placa.

Éste proporciona una terminal, un editor de texto para editar programas PLC y de movimiento y un entorno de trabajo. Adicionalmente, hay un conjunto de herramientas para configurar y trabajar con la placa Turbo PCMAC2.

En el APÉNDICE B se presenta una guía de manejo del programa PWIN32PRO2 donde se describen las características del mismo. Mientras que para la sintonización de los motores se utilizó el software PMACTUNINGPRO2.

### ASPECTOS BÁSICOS SOBRE PMACTUNINGPRO2

El programa PMACTUNINGPRO2 forma parte del conjunto de programas que se encuentran dentro del PWIN32PRO2, aunque este software puede ser ejecutado directamente, sin necesidad de abrir el programa principal.

Este software está diseñado como una herramienta de configuración y diagnóstico, el cual permite crear y administrar varios aspectos de la sintonización de los motores. El mismo permite configurar y optimizar las ganancias de lazo de corriente, verificar el funcionamiento de un motor a lazo abierto, calibrar los comandos de servo, configurar y optimizar las ganancias de lazo de posición para el algoritmo PID, y poner en práctica los diferentes filtros de velocidad y aceleración. Además de las funciones de sintonización provee utilidades de trazado en tiempo real, monitoreo del estado del motor, ventanas de inspección y una terminal sencilla para monitorear y realizar diferentes tareas en el sistema.

Una vez ejecutado el programa se inicia la siguiente ventana (FIGURA 4-1). El mismo automáticamente detecta la placa Turbo PMAC2, de encontrarse ésta instalada; en caso contrario abre una ventana solicitando que se elija una placa válida.

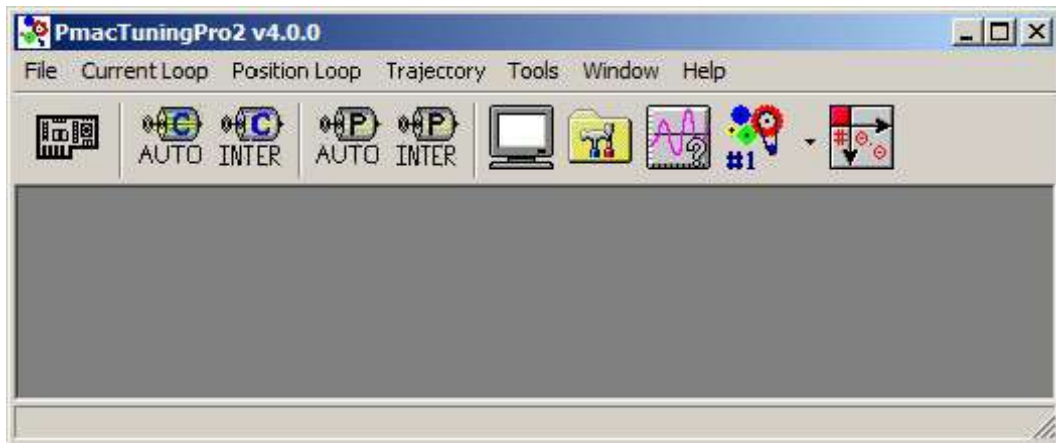


FIGURA 4-1: Ventana PMACTUNINGPRO2

En el APÉNDICE C se adjunta una descripción de los distintos comandos que entrega el programa PMACTUNINGPRO2, haciendo énfasis en los utilizados para configurar el sistema.

## AJUSTES DEL SISTEMA

### Ubicación del sistema de control

El sistema de control de la mesa XY se encuentra repartido en dos gabinetes, tal como se observa en la siguiente FIGURA 4-2.



Figura 4-2: Gabinetes donde se aloja el sistema de control



En el gabinete menor que se muestra en la FIGURA 4-2 se encuentra instalado el controlador Advantage 400.



FIGURA 4-3: Gabinete menor que aloja al controlador Advantage 400

Los drivers FESTO de los servomotores se encuentran en la parte superior del gabinete mayor tal como se muestra en la FIGURA 4-4.



FIGURA 4-4: Gabinete mayor que aloja los drivers Festo

## **Procedimiento para el arranque del sistema**

Para dar inicio al sistema se deben seguir los siguientes pasos:

1. Asegurarse que los conectores de los enconders estén conectados a los drivers y que el conector D-sub 25 que proviene del gabinete menor, donde está alojado el controlador, esté conectado en el puerto ubicado en la derecha del gabinete mayor.
2. Conectar a la red tanto el controlador CNC como los driver del motor.
3. Asegurarse que la parada de emergencia esté activada. Esto puede verificarse observando el estado del ojo de buey rojo ubicado en la puerta del gabinete mayor (Luz roja encendida = parada de emergencia activada).
4. Abrir el gabinete mayor y levantar el interruptor general, luego los interruptores del motor X y del motor Y.
5. Para energizar los drivers de los motores se deb presionar el pulsador verde ubicado en la puerta del gabinete mayor, el ojo de buey verde debe encenderse.
6. Acceder al gabinete menor y levantar el interruptor para dar energía al controlador. Seguidamente se iniciará la carga del sistema operativo Windows CE del controlador.
7. Una vez que el controlador haya terminado de cargar todos los archivos se deberá realizar la búsqueda de home. Este paso es necesario, pues de lo contrario cualquier operación que se quiera realizar arrojará un error de seguimiento (Fatal Following Error).
8. Para realizar la búsqueda de home se deberá proceder de la siguiente manera: Utilizando las teclas de función ubicadas en el panel frontal del controlador, presionamos la tecla F9 y seguidamente la tecla F2, con lo cual accederemos a la rutina de búsqueda del home. Luego con la tecla F4 seleccionamos el motor X y presionamos la tecla F5 o F6, con esto comenzará la búsqueda del home. Una vez que el home haya sido encontrado, presionamos la tecla F4 y seleccionamos el motor Y. Nuevamente con la tecla F5 o F6 iniciamos la búsqueda del home. Finalizado esto el sistema ya estará listo para ser utilizado.

## **Calibración del conversor digital/analógico**

La calibración del conversor digital analógico permite encontrar el valor óptimo de compensación en la señal de salida. Los pasos a seguir para realizar ésta calibración se encuentran en el APÉNDICE C (pag. 81). Para realizar la calibración del

convertor digital analógico (DAC) para los dos motores del sistema de posicionamiento se utilizaron los siguientes valores y el comando **DAC Calibration**, y se obtuvieron los resultados mostrados en la TABLA 4-1.

Parámetros	Motor X	Motor Y
Number of test iterations	2	2
Calibration step size	0,01	0,01
<b>Resultados</b>		
Offset sugerido	3	4
Banda muerta	62	84

TABLA 4-1: Calibración DAC

Luego de aplicar al sistema los valores sugeridos en el mencionado test se dejó calibrado al convertor digital/analógico.

### Test de lazo abierto

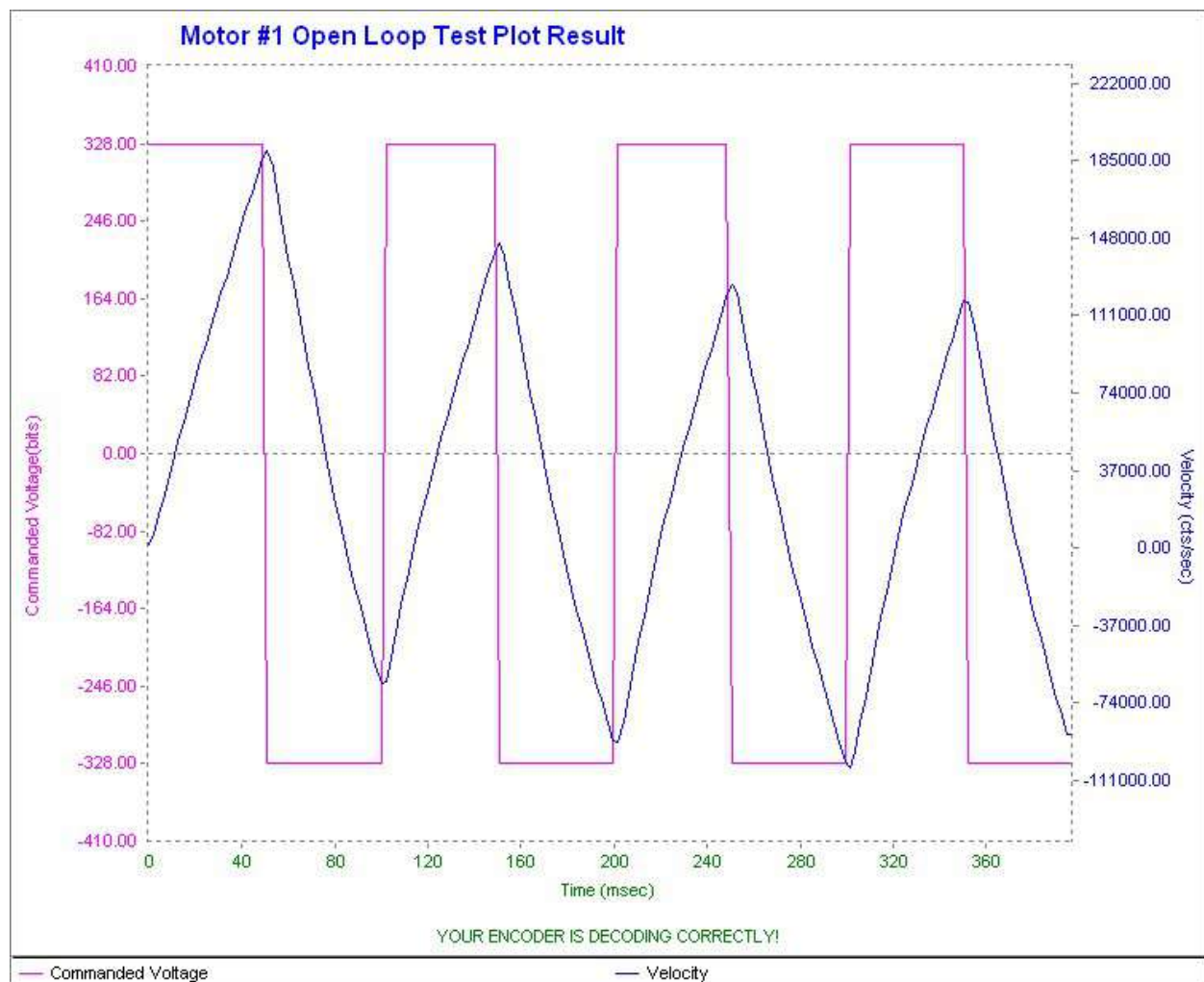


FIGURA 4-5: Gráfica a lazo abierto para el Motor X

El test a lazo abierto permite comprobar el funcionamiento de los motores y de los encoders. Los pasos de configuración para realizar el test se encuentran especificados en el APÉNDICE C (pag. 83). Los valores que se han utilizado para realizar el test, por medio del comando **Open Loop Test**, se especifican en la TABLA 4-2.

Parámetros	Motor X	Motor Y
Open Loop Magnitude (%)	1	1
Open Loop Time (msec)	50	50
Number of Repetitions	4	4

TABLA 4-2: Parámetros del test a lazo abierto

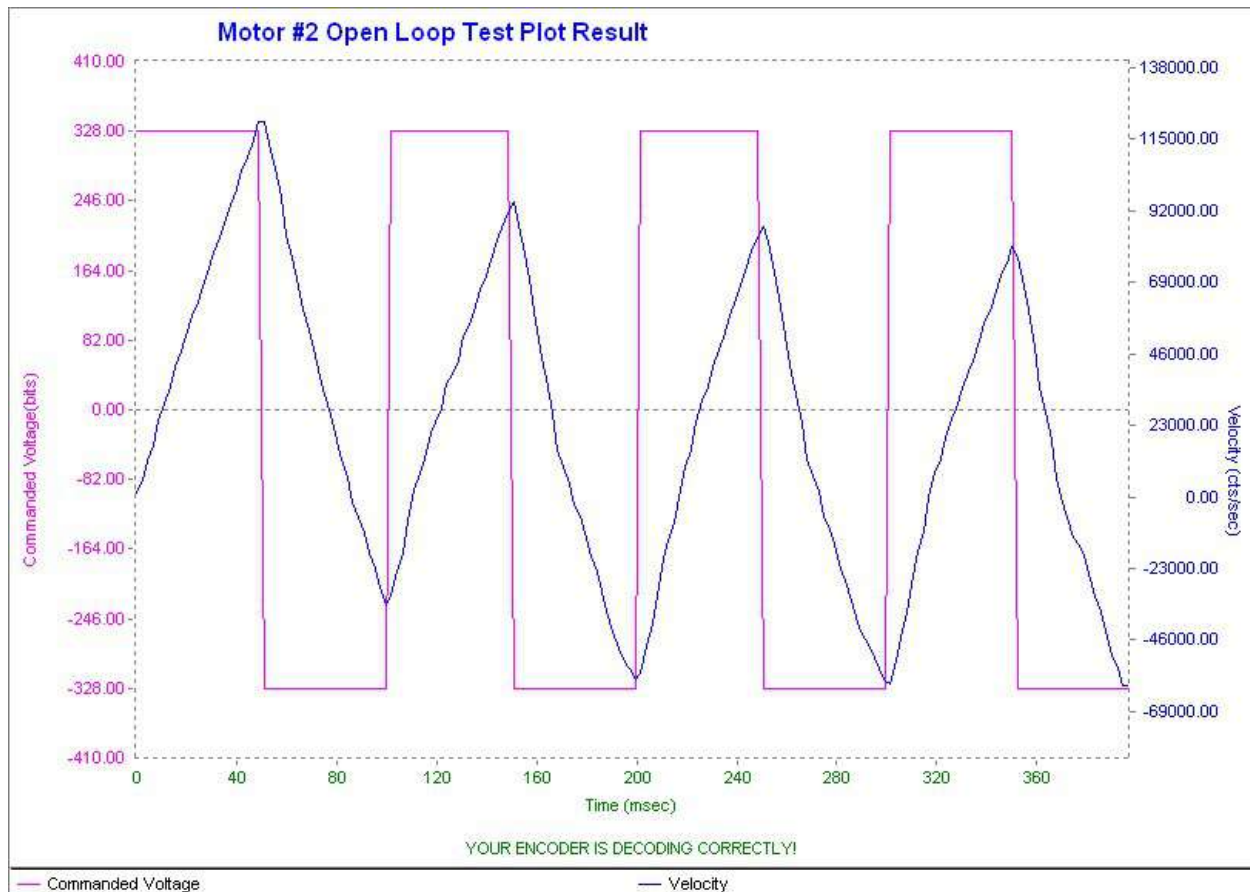


FIGURA 4-6: Gráfica a lazo abierto para el Motor Y

Los resultados arrojados pueden verse en la FIGURA 4-5 y 4-6, que corresponden a los motores X e Y, respectivamente. También con el test se pudo ver que los encoders trabajan correctamente.

## PROGRAMACIÓN DE LAZOS DE CONTROL INTERNOS

Una vez finalizados los test mencionados anteriormente se procedió a realizar la sintonización de los motores utilizando el algoritmo de control que posee la placa Turbo PMAC2, el cual se puede personalizar para construir un lazo de control que se ajuste al sistema que deseamos controlar. En FIGURA 4-7 se muestra el digrama de bloques general del algoritmo de control mencionado.

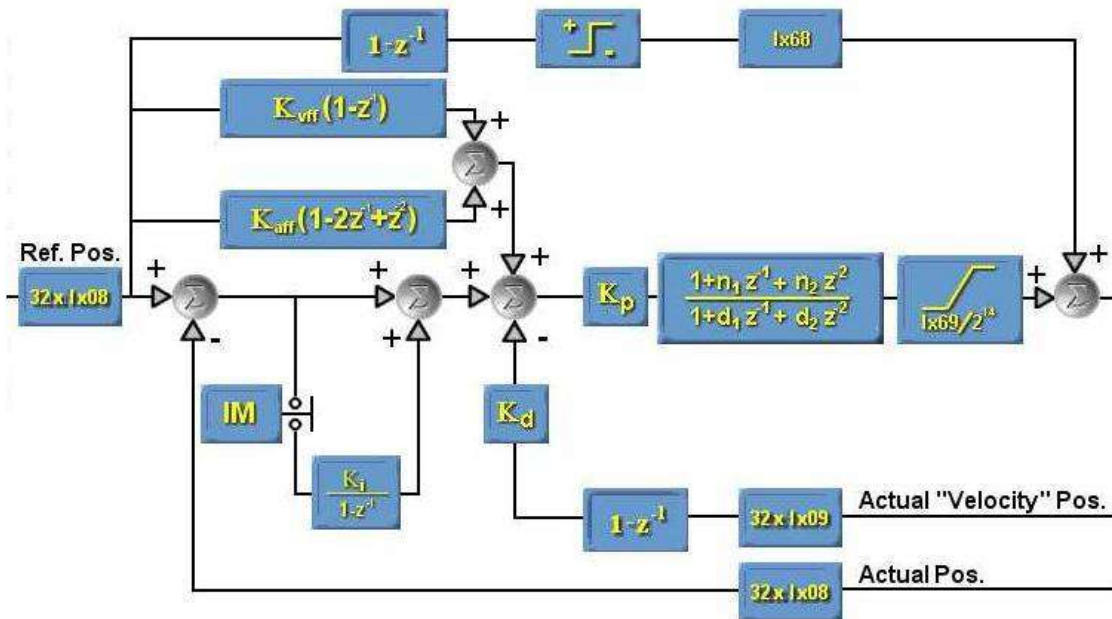


FIGURA 4-7: Controlador PID + filtros notch y pasabajo

Para una mejor interpretación del algoritmo anterior se definirán algunos términos y qué variables “I” los representan. Cabe mencionar que estas variables “I” son parámetros que permiten al usuario, a través de su modificación, darle personalidad a la placa TurboPMAC2, y en particular al algoritmo de control.

$I_{x08}$ : Factor de escala de la posición. Especifica el factor de escala en el registro interno de la posición del motor correspondiente. Tiene un valor por defecto que no es necesario cambiar, salvo en casos excepcionales.

$I_{x09}$ : Factor de escala de la velocidad. Especifica el factor de escala en el registro interno de la velocidad del motor correspondiente. Tiene un valor por defecto que no es necesario cambiar, salvo en casos excepcionales.

$I_{x11}$ : Límite de error fatal de seguimiento. Cuando se excede este valor el motor es desconectado.

$K_p = I_{x30}$  : Ganancia proporcional.

$K_d = I_{x31}$  : Ganancia derivativa.

$K_{vff} = I_{x32}$  : Ganancia correspondiente al feedforward de velocidad.

$K_i = I_{x33}$  : Ganancia integral.

$IM = I_{x34}$  : Modo de integración. Su función es activar (valor = 0) o desactivar (valor = 1) el módulo de control integral.

$K_{af.f} = I_{x35}$  : Ganancia correspondiente al feedforward de aceleración.

$I_{x68}$  : Feedforward a la fricción. Permite superar errores debido a la fricción mecánica.

$I_{x69}$  : Define el límite en la señal de salida. Si por alguna razón la señal de salida es mayor al valor que está definido en esta variable, automáticamente se le asigna este último de manera de garantizar el normal funcionamiento del sistema.

En el digrama se muestra también un bloque que corresponde a los filtros notch y pasabajo, dado que estos filtros no se utilizaron no se realizará una descripción de los mismos. De cualquier manera, la información sobre su utilización y manera de configurarlos se encuentra en el manual [11].

Para realizar la sintonización, el programa PMACTUNINGPRO2 presenta dos alternativas, una es de autosintonización del PID y otra es de una sintonización interactiva. Primeramente se utilizó la autosintonización para conocer los valores de ganancias que arrojaba el programa y a partir de ellos realizar una sintonización interactiva hasta encontrar los valores de ganancia adecuados para el sistema.

### **Autosintonización del PID interno**

Esta opción que provee el programa PMACTUNINGPRO2 permite ajustar automáticamente los valores de las ganancias del algoritmo de control que hemos seleccionado por medio del menú de opciones. Una vez definido el aspecto que tendrá dicho algoritmo de control y los valores del mismo se puede realizar la autosintonización, con lo cual se le asignarán ganancias a los distintos bloques del algoritmo de control, y una vez finalizada la ejecución de las distintas rutinas que permiten establecer valores en función del sistema a controlar, estaremos en condiciones de probar el lazo de control con las distintas trayectorias para conocer

cómo se comporta, y si es necesario, hacer las correcciones que correspondan por medio de la sintonización interactiva.

Al seleccionar esta herramienta para realizar la sintonización del PID se presenta la siguiente ventana de configuración (FIGURA 4-8). Como puede observarse hay varios parámetros a definir antes de ejecutar la aplicación que nos permitirá determinar las ganancias del lazo de control. En la misma hay valores que se fijaron y se mantuvieron durante todo el proceso de sintonización, mientras que otros se fueron modificando para lograr una respuesta satisfactoria.

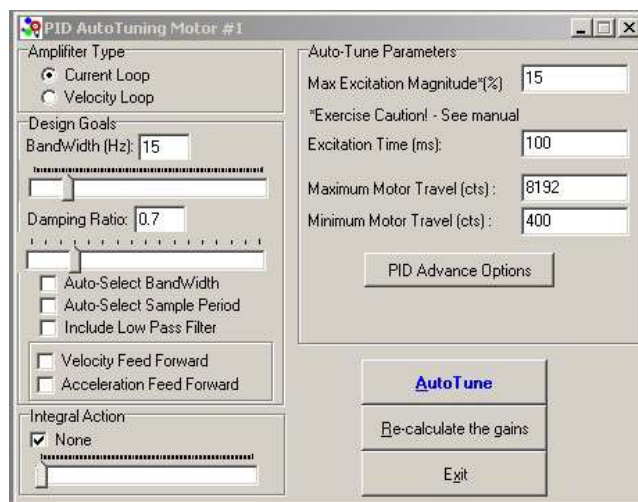


FIGURA 4-8: Ventana de autosintonización

En la sección “Amplifier Type” se seleccionó Current Loop como tipo de amplificador de acuerdo a la configuración de los drivers del controlador. Otros de los parámetros que se mantuvieron fijos son los correspondientes a la sección “Auto-Tune Parameters”, donde se utilizó un 15 % de la excitación máxima con un tiempo de excitación de 100 ms. Con respecto al movimiento de los motores se fijaron 400 cts para el desplazamiento mínimo y 8.192 cts para el desplazamiento máximo. Finalmente de las opciones avanzadas del PID se seleccionó que el test se realizara con 1 iteración y que el movimiento del motor fuera en un sólo sentido.

Dentro de los objetivos de diseño (Design Goals) se utilizó como punto de partida un ancho de banda de 15 Hz, que luego fue cambiado a 20 Hz para poder lograr la reducción del error de seguimiento, y un factor de amortiguamiento de 0,7. Estos valores se eligieron teniendo en cuenta el tipo de sistema a controlar.

Como primer paso en la autosintonización se descartó el uso de control integral y los filtros de feedforward a la velocidad y a la aceleración. Con esta configuración

inicial se lanzó el programa de autosintonización, permitiendo así asignar las primeras ganancias al algoritmo de control. Luego de varias simulaciones con distintas configuraciones de algoritmos se llegó a uno definitivo, al cual se le incluyó el control integral y los filtros de feedforward a la velocidad y a la aceleración.

### Sintonización interactiva del PID interno

Seleccionando esta alternativa para realizar la sintonización de nuestro algoritmo de control, nos permitió actuar directamente sobre las ganancias de los distintos bloques, estableciendo valores y probando el sistema con las distintas trayectorias disponibles. A partir de los resultados obtenidos con la autosintonización se realizaron las correcciones en las ganancias hasta dar por sintonizado al sistema. En la FIGURA 4-9 y 4-10 se muestran los valores finales correspondientes a la sintonización de motor (X) y del motor (Y), respectivamente. También puede observarse los valores de la trayectoria S-Curve Velocity utilizada comprobar la sintonización realizada y ajustar el error de seguimiento en los momentos de aceleración/desaceleración tal como lo sugería el manual del controlador. Una de las ventajas de utilizar esta trayectoria radica en que la derivada de la aceleración (choque) es una función con valores acotados, lo que hace más suave los movimientos y permite reducir el error.

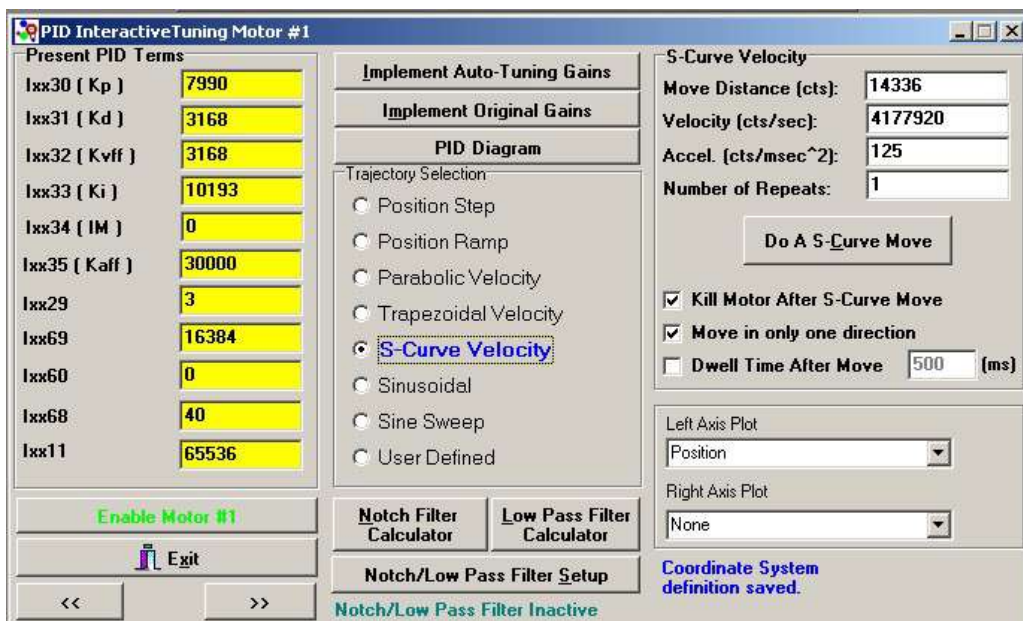


FIGURA 4-9: Sintonización interactiva Motor X



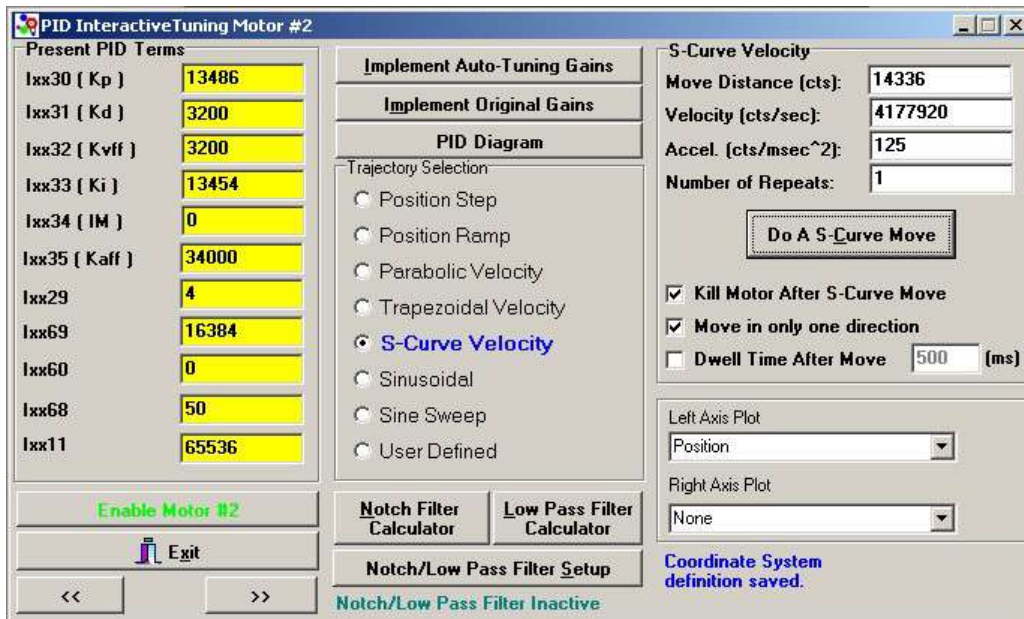


FIGURA 4-10: Sintonización interactiva Motor Y

El proceso de sintonización a través de estas herramientas se realizó de la misma manera para cada uno de los motores. Por lo cual los resultados finales de la sintonización de los dos motores se resumen en la TABLA 4-3.

PID Interactive Tuning	Motor X	Motor Y
Posición inicio simulación (cts)	-80.000	-128.000
Present PID Terms		
Ixx30 (Kp) Proporcional Gain	7.990	13.486
Ixx31 (Kd) Derivative Gain	3.168	3.200
Ixx32 (Kvff) Velocity Feed Forward Gain	3.168	3.200
Ixx33 (Ki) Integral Gain	10.193	13.454
Ixx34 (IM) Integral Gain	0	0
Ixx35 (Kaff) Acceleration Feed Forward Gain	30.000	34.000
Ixx29 Command Out Offset	3	4
Ixx69 Command Out Limit	16.384	16.384
Ixx60 Servo Cycle Extension	0	0
Ixx68 Friction Feed Forward Gain	40	50
Ixx11 Fatal Following Error	65.536	65.536
Trajectory Selection	S-Curve Velocity	S-Curve Velocity
Move Distance (cts)	14.336 [35 mm]	14.336 [35 mm]
Velocity (cts/sec)	4.177.920 [170mm/sec]	4.177.920 [170mm/sec]
Time Accel. (msec) (Ixx20)	125	125
Time S-Curve (msec) (Ixx21)	40	40
Number of Repetitions	1	1
Following Error (cts)	12,9 [31,5 micrones]	11,8 [28,8 micrones]

TABLA 4-3: Valores finales de la sintonización

Con estos valores se obtuvo una respuesta satisfactoria del sistema, la cual se valoró analizando el error de seguimiento, el cual cumplió con lo requerido para sistemas de alto precisión de posicionamiento y a los valores logrados por la mesa XY controlada por el sistema de arquitectura abierta.

La valoración del desempeño del sistema se realizó analizando al mismo con la curva S de velocidad. En las FIGURAS 4-11 y 4-12 se presentan las gráficas correspondientes a la última simulación, donde se muestran la evolución del error de seguimiento, la posición actual y la comandada. En las dos figuras citadas, la señal de posición comandada y la posición actual se solapan, pudiéndose ver una pequeña diferencia en los períodos de aceleración y desaceleración, donde se puede ver que el error de seguimiento es mayor que en el período de velocidad constante.

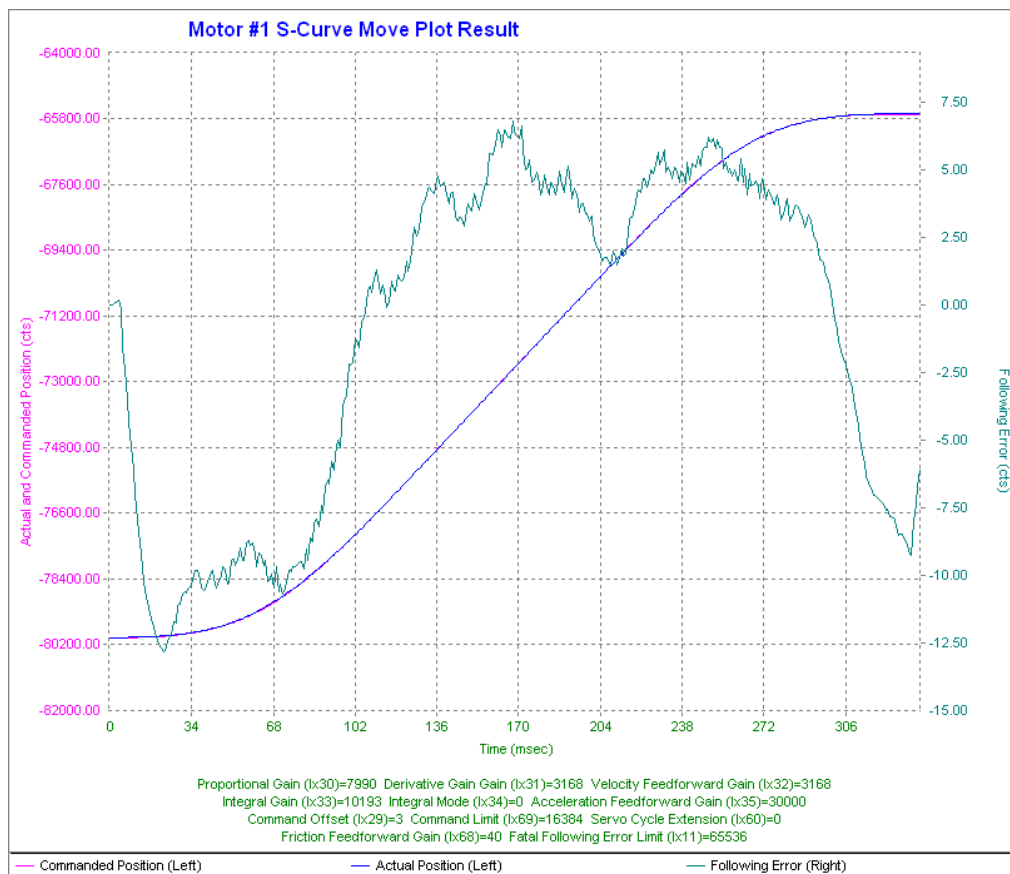


FIGURA 4-11: Test Curva S de velocidad para el motor X

Para realizar la prueba de desempeño del sistema con la curva S de velocidad se utilizaron los valores mostrados en la anterior TABLA 4-3. Los resultados arrojados por la simulación dieron que el error de seguimiento estuvo en un valor máximo de 31,5  $\mu m$  y 28,8  $\mu m$  para el motor X y para el motor Y, respectivamente. Estos valores de

error de seguimiento, cumplen con lo requerido en sistemas de alta precisión en el posicionamiento.

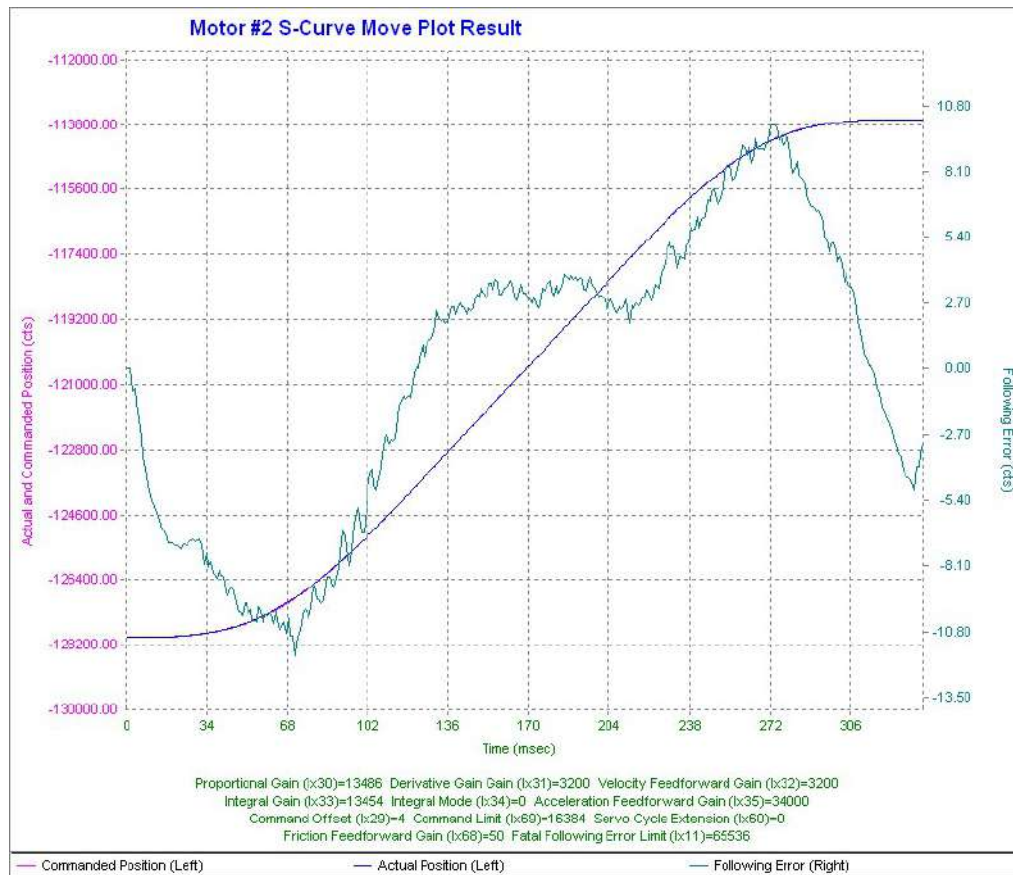


FIGURA 4-12: Test Curva S de velocidad para el motor Y

## PROGRAMACIÓN DE LAZOS DE CONTROL PERSONALIZADOS

### Algoritmos personalizados

Otra alternativa que nos provee la placa TurboPMAC2 al momento de realizar un lazo de control, es la de utilizar la opción de desarrollar nuestro propio algoritmo de control, tal como se describe en el APÉNDICE D.

## **CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES**

Una vez finalizada la integración y puesta en marcha del controlador numérico a la mesa de posicionamiento podemos decir que por medio de este trabajo se consiguió adquirir el conocimiento de un sistema de posicionamiento de dos dimensiones denominado mesa en cruz, como está conformada dicha mesa y la manera de llevar un sistema físico, como es la mesa de posicionamiento, en un modelo matemático.

Por medio de la instalación de una escala lineal se obtuvo el conocimiento de un sistema de medición de posición avanzado y los procedimientos necesarios para vincular el instrumento a la mesa de posicionamiento. También se logró cumplir con todas las tolerancias en el montaje requeridas por el fabricante.

La integración del controlador numérico llevada a cabo me permitió conocer la manera de manejar y configurar un controlador avanzado, logrando vincularlo a un sistema de alta precisión en el posicionamiento. Como parte de esta integración se logró sintonizar y ajustar el sistema utilizando trayectorias conocidas y obteniendo errores de seguimiento acordes a los de máquinas herramientas modernas.

Finalmente se dejó un sistema flexible que permitirá la implementación de distintos lazos de control y programación sencilla a través de código G.

## **APÉNDICE A: PLANOS DE FABRICACIÓN Y FIJACIÓN**

En este apéndice se adjuntan los planos de fabricación de los soportes utilizados para vincular la escala lineal con la mesa de posicionamiento. También se adjuntan los planos utilizados para la fijación de la escala lineal.

## APÉNDICE B: PWIN32PRO2: PROGRAMA DEL CONTROLADOR ADV. 400

La presente guía tiene como fin mostrar las herramientas básicas que se utilizaron para configurar el controlador y una descripción rápida de las demás funciones. De todas maneras en los manuales [14] y [15] puede encontrarse información avanzada sobre el uso del programa PWIN32PRO2.

Al iniciar el programa nos encontramos con la interfase que se muestra en la FIGURA B-1. Donde se puede ver la barra de menú que tiene la particularidad de ser una barra de menú dinámica. Esto significa que el menú cambia en función de la ventana que se pone de relieve. Una sección correspondiente al administrador de proyectos, una herramienta que se puede utilizar para proyectos complejos, donde se mostrará una lista de los archivos que forman parte del proyecto, permitiendo agregar o quitar archivos, organizar y renombrar, etc. Otra sección del programa corresponde a la ventana de mensajes. En esta se mostrarán todas las acciones que se vayan sucediendo en el programa. Esta información puede resultar útil para realizar un seguimiento de las distintas acciones que se vayan realizando y poder detectar errores o un funcionamiento inadecuado del sistema.

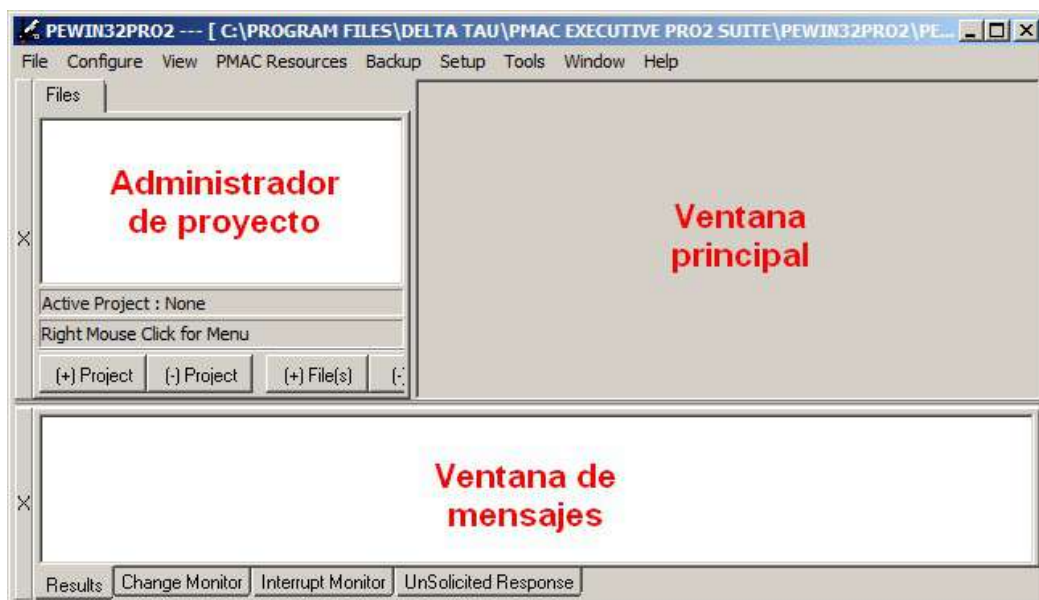


FIGURA B-1: Interfase del programa PWIN32PRO2

La barra de menú principal esta formada por los siguientes ítems:

- **File:**

- **New File:** Abre el editor y crea un nuevo archivo llamado untitled.pmc listo para ser editado.
- **Open File:** Abre el editor para cargar el archivo seleccionado.
- **New Workspace:** Crea un nuevo espacio de trabajo, cerrando todas las ventanas abiertas.
- **Open Workspace:** De haber un espacio de trabajo lo cierra y abre el espacio de trabajo guardado en el archivo seleccionado.
- **Save Workspace:** Salva el espacio de trabaja en un archivo.
- **Save Workspace As:** Renombra el actual espacio de trabajo.
- **Close Workspace:** Cierra todas las ventanas abiertas y guarda el espacio de trabajo.
- **Show Project Manager:** Muestra u oculta el administrador de proyectos.
- **Upload Program(s):** Carga un programa de movimiento o PLC en un archivo, y luego lo abre en el editor.
- **Upload Variables:** Permite cargar un rango de variables I, P, Q o M en el editor.
- **Download File:** Permite subir a la memoria de la placa Turbo PMAC2 un archivo.
- **Exit:** Cierra el programa.

#	Description	Value
220	Motor 2 Jog/Home Acceleration Time	125
221	Motor 2 Jog/Home S-Curve Time	40
222	Motor 2 Jog Speed	204.8
223	Motor 2 Homing Speed And Direction	3.413333
224	Motor 2 Flag Mode Control	\$820001
225	Motor 2 Flag Address	\$78008
226	Motor 2 Home Offset	0
227	Motor 2 Position Rollover Range	0
228	Motor 2 In-Position Band	160
229	Motor 2 Output/1st Phase Offset	4
230	Motor 2 PID Proportional Gain	13486
231	Motor 2 PID Derivative Gain	3153
232	Motor 2 PID Velocity Feed Forward Gain	3153
233	Motor 2 PID Integral Gain	13454
234	Motor 2 PID Integration Mode	0
235	Motor 2 PID Acceleration Feed Forward Gain	39581
236	Motor 2 PID Notch Filter Coefficient N1	0
237	Motor 2 PID Notch Filter Coefficient N2	0
238	Motor 2 PID Notch Filter Coefficient D1	0

Range: 0..8,388,607  
Units: msec Default: 0

FIGURA B-2: Listado de variables "1"

- **Configure:** Entre las opciones que presenta .La placa Turbo PMAC2 tiene distintos tipos de variables. Éstas variables están especificada por una letra (I, P, Q o M) seguida de un número entre 0 y 8191. Cada letra denota un tipo diferente de variable con sus propiedades.
  - **I-Variables:** Éstas son llamadas variables de inicialización o de configuración. Se encuentran en un lugar fijo de la memoria y tienen significados predefinidos. A través de estas variables se puede modificar cada aspecto de la placa Turbo PMAC2. Las variables que van desde I0 a I8191 están organizadas como se muestra en la TABLA B-1.

Rango	Descripción
I0 – I99	Configuración global de la placa
I100 – I199	Configuración del motor 1
I200 – I299	Configuración del motor 2
...	
I3200 – I3299	Configuración del motor 32
I3300 – I4799	Configuración suplementaria del motor
I4900 – I4999	Configuración de estado
I5000 – I5099	Configuración del recopilador de datos y demultiplexor ADC
I5100 – I5199	Configuración del sistema de coordenadas 1
I5200 – I5299	Configuración del sistema de coordenadas 2
...	
I6600 – I6699	Configuración del sistema de coordenadas 16
I6800 – I6999	Configuración de MACRO IC
I7000 – I7999	Configuración SERVO IC
I8000 – I8191	Configuración de la tabla de conversión de encoder

TABLA B-1: Descripción general de las variables I

Para una descripción detallada de cada una de estas variables se puede consultar al manual de referencia [11].

Las variables I tienen algunas características particulares respecto de las demás variables que maneja la placa Turbo PMAC2, estas son:



- **Asignación de valor:** El valor asignado a una variable I puede ser realizado por una constante o que una expresión determine dicho valor.
- **Rango limitado:** Para aquellas variables I con un rango limitado, una asignación fuera del rango permitido, no va a causar un error. El valor será asignado automáticamente utilizando el truncamiento, es decir, que al módulo del valor asignado se le resta el rango, y este valor es el que se le dará a la variable I.
- **Almacenamiento no volátil:** Cuando un valor es asignado a una variable I, el valor permanece activo en la memoria de la placa que es volátil. Si se desea que estos valores permanezcan en la placa de manera permanente se debe utilizar el comando SAVE. Escribiendo este comando en forma online a través de la ventana Terminal se guardarán todos los valores asignados a las variables I en una memoria flash.
- **Valores por defecto:** Los valores por defecto de las variables I están contenidos en el firmware entregado por el fabricante.

Accediendo al menú Configure nos encontramos que estas variables se pueden listar de dos maneras, por número de variable o por categoría. En la FIGURA B-2 se puede ver una ventana donde se muestran las variables I por número. Esta forma de listar las variables I es la manera más eficiente de administrarlas y monitorearlas. En la mencionada ventana se puede ver, en la parte superior, algunas herramientas para buscar una variable determinada o para ir moviéndonos a través de las mismas. El listado de variables presenta tres columnas. La primera (#) corresponde al número de variable, la segunda columna (Description) describe brevemente la función o parámetro asociada con el número de variable I y la última columna (Value) muestra el valor actual que posee la variable I. Este valor puede ser modificado desde aquí, simplemente haciendo doble clic sobre el valor elegido, y colocando uno nuevo. Presionando la tecla <ENTER> se le asignará el nuevo valor elegido.

Finalmente en la parte inferior de la mencionada ventana se encuentran tres parámetros importantes de la variable I seleccionada.

- Range: Indica que valores puede tomar.
  - Unit: Muestra en que unidad está expresada.
  - Default: Define cual es el valor que contiene por defecto.
- **P-Variables:** Éstas son variables de propósito general disponibles para el usuario. Son de punto flotante de 48 bits y tienen una ubicación fija en la memoria de la placa. Hay 8192 variables que van desde la P0 a P8191. A través de este menú se abre una ventana donde es posible configurar estas variables y monitorear el estado de las mismas.
  - **Q-Variables:** Al igual que las variables P, éstas son de propósito general y el usuario puede disponer de ellas. Se utilizan para manejar los sistemas de coordenadas. Se disponen 8192 variables Q, que van desde la Q0 a Q8191. A través de este menú se abre una ventana donde es posible configurar estas variables y monitorear el estado de las mismas.
  - **M-Variables:** Por medio de éstas variables el usuario puede acceder a la memoria de la placa Turbo PMAC2 de manera sencilla. El comando SAVE debe ser utilizado para retener el valor de estas variables. Se disponen 8192 variables M, que van desde la M0 a M8191. A través de este menú se abre una ventana donde es posible configurar estas variables y monitorear el estado de las mismas.
  - **Coordinate Systems:** Al elegir esta opción de menú se abre una ventana, como muestra la FIGURA B-3, en la que se presentan los parámetros para configurar el o los sistemas de coordenadas.

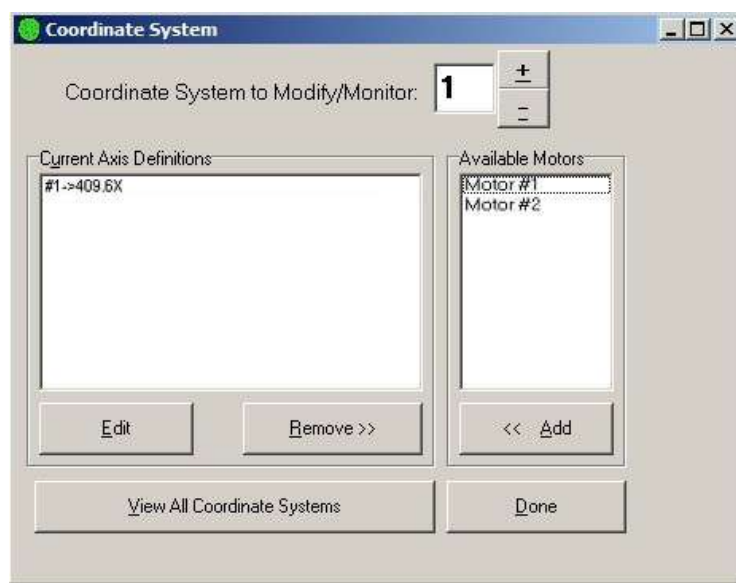


FIGURA B-3: Configuración sistema de coordenadas

Al acceder a esta pantalla de configuración nos encontramos con:

- **Coordinate System to Modify/Monitor:** Este campo muestra el sistema de coordenadas que está utilizando la placa. Usando los botones + o – podemos mover los distintos sistemas de coordenadas para conocer los valores asignados. Por defecto el sistema está configurado con el sistema de coordenadas 1.
- **Current Axis Definitions:** Esta sección presenta una lista con las definiciones de ejes para el sistema de coordenadas actual, correspondiente al motor seleccionado. En el caso que seleccionemos el motor 1, se mostrará la definición de ejes (para nuestro caso #1->409,6X). De la misma manera si seleccionamos el motor 2 (#2->409,6Y). Estos valores los asigna automáticamente la placa, leyendo los valores que hemos introducido en el programa de configuración de la Turbo PMAC2 desde el controlador.
- **Edit:** Por medio de este botón se puede editar el valor que tiene la definición de ejes.
- **Remove:** Este botón elimina al motor seleccionado en la ventana de definición del eje del sistema actual de coordenadas.
- **Available Motors:** Muestra una lista de todos los motores disponibles en sistema de coordenadas actual.
- **Add:** Este botón agrega el motor seleccionado en la ventana de motores disponibles del sistema actual de coordenadas.
- **View All Coordinate Systems:** Esta opción abre una ventana que contiene una lista con todos los sistemas de coordenadas disponibles y sus definiciones de ejes.
- **Done:** Cierra la ventana de configuración de sistemas de coordenadas y aplicar los valores ingresados.
- **Encoder Conversion Table:** Por medio de esta opción de menú se puede alterar, actualizar, salvar o recuperar la tabla de conversión de encoder.
- **Econder Conversion Table MACRO:** Opción no disponible para la placa Turbo PMAC2.
- **Modbus Setup:** Sólo disponible para comunicación a través de USB o ethernet, las cuales no están configuradas para esta placa.

- **MACRO Ring ASCII:** Pantalla de configuración para una comunicación con la placa a través de macro ring ascii.
- **View:** Este menú contiene herramientas de diagnóstico que se actualizan en tiempo real, las cuales se muestran a continuación.
  - **Terminal:** Esta opción abre una ventana denominada Terminal que representa una conexión directa a la placa Turbo PMAC2.

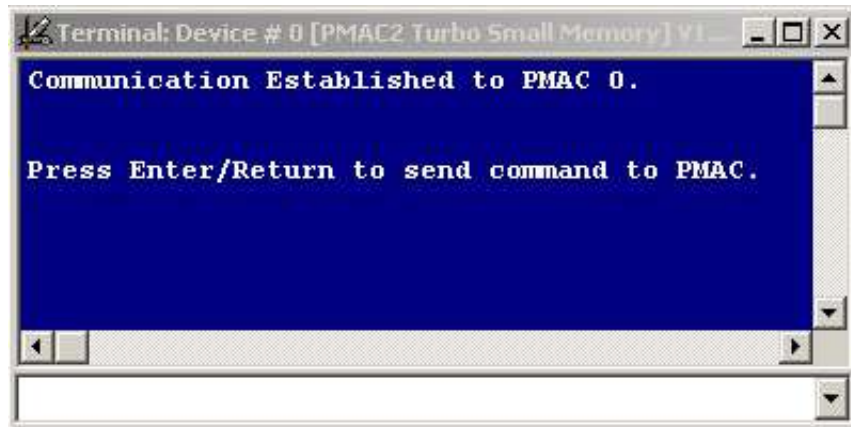


FIGURA B-4: Ventana terminal

En la FIGURA B-4 se presenta la ventana terminal, la cual consta de dos partes: la entrada de comandos y la ventana de respuesta. Cualquiera sean los caracteres que se tipeen en la entrada de comandos serán enviados a la placa una vez que se presione la tecla <ENTER>. Los mismos pueden representar un comando o no, en la ventana de respuesta se mostrará la respuesta con un color correspondiente al modo de comunicación. Si un comando es rechazado por la placa un error de código será mostrado para que el usuario pueda realizar la corrección correspondiente.

Al seleccionar el menú Terminal se produce una modificación en el menú dinámico principal del PWIN32PRO2, mostrando un ítem nuevo que se compone de un conjunto de opciones para personalizar la ventana Terminal.

- **Watch Window:** Por medio de esta ventana es posible monitorear un comando, dirección o variable en tiempo real. La elección de esta opción también modifica al menú principal activando las herramientas para adicionar, borrar, editar y limpiar el valor a monitorear, personalizar la ventana de monitoreo, seleccionar prioridades y hasta cambiar la placa a controlar.

- **Position:** Esta ventana (FIGURA B-5) provee información de la posición de los motores. Una vez elegida esta opción se activarán las herramientas para mostrar otras informaciones como la velocidad y el error de seguimiento. Además, permite cambiar las unidades con que se mostrarán las variables citadas, personalizar la vista de la ventana, explorar los distintos motores presentes y cambiar la placa a monitorear.



FIGURA B-5: Ventana de visualización de la posición

- **Jog Ribbon:** Por medio de esta ventana se puede acceder a los comandos que permiten mover cualquier motor en cualquier dirección mediante el uso de botones. Además, permite la visualización y la reconfiguración de los parámetros de desplazamiento de cualquier motor a través del botón “Setup Jog Parameters”. En la FIGURA B-6 puede verse la ventana, en la cual se encuentra la sección “Select Motor” la cual indica el motor presente sobre el cual pueden realizarse las acciones de desplazamiento.

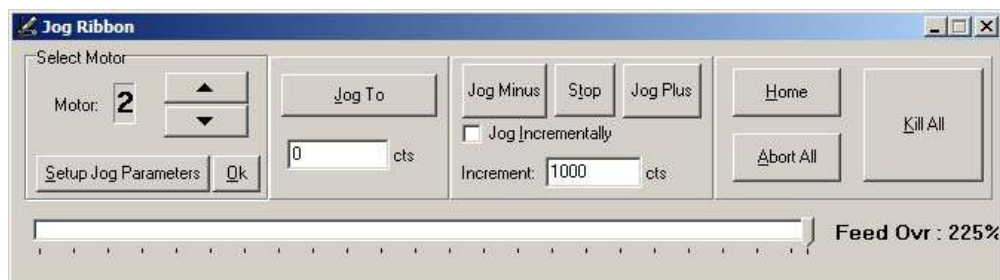


FIGURA B-6: Controles para el desplazamiento manual de los motores

Seguidamente se encuentran tres divisiones, en donde la primera contiene el comando para llevar al motor a una posición definida por el número de cuentas que en la casilla mostrada. En la segunda división se encuentran los controles para mover al motor de manera continua o incremental. Finalmente la tercer división presenta tres controles que son: el “Home” el cual permite realizar la búsqueda de home con el motor seleccionado, el control “Abort All”, el cual permite abortar todas las acciones de movimiento y por último el control “Kill All” cuya función es la de desactivar todos los motores.

- **CS Axis Jog Ribbon:** Por medio de esta pantalla se puede logra el movimiento de los ejes predefinidos en un determinado sistema de coordenadas en cualquier dirección mediante el uso de botones.
- **DPR Viewer:** Esta opción provee una manera de visualizar y cambiar el contenido de la DPRAM desde la pc donde está instalado el programa PWIN32PRO2.
- **Connector Status:** Esta opción permite monitorear el estado de los conectores de la placa Turbo PMAC2.
- **Motor Status:** Usando esta pantalla se pueden visualizar en tiempo real el estado de los bit correspondientes a los registros X e Y del motor presente y su interpretación.
- **Coordinate Systems Status:** Muestra en tiempo real el estado del sistema de coordenadas actual.
- **Global Status:** Esta ventana presenta en tiempo real el estado global de los bits de la placa Turbo PMAC2.
- **MACRO Status:** Permite controlar el estado de los bits que corresponden a los MACRO.
- **Motor Setup Summary:** Muestra un resumen de la configuración del motor seleccionado.
- **Program/PLC Status (and Upload):** Por medio de esta opción se accede a una ventana que muestra información sobre todos los programas de movimiento y PLC ubicados en la memoria de la placa Turbo PMAC2. Para cada programa se encuentran en memoria se detalla el número de programa, la dirección de inicio del programa y la cantidad total de memoria ocupada. Además, es posible seleccionar cualquier programa PCL o de movimiento para cargar y editar.

- **Special Program Status (and Upload):** Esta ventana muestra información sobre programas especiales cargados en la memoria de la placa.
- **Specialized Buffers:** Muestra una lista con las asignaciones de memoria.
- **PLCC Status:** Provee información de los programas PLCC cargados en memoria.
- **PMAC Resources:** Por medio de este menú se accede a las herramientas que permiten visualizar los recursos de CPU, de memoria y de MACROS.
- **Backup:** Este menú permite salvar, restaurar y verificar de manera completa o parcial la configuración de la placa Turbo PMAC2.
- **Setup:** Utilizando este menú se accede a la configuración general del programa, y por medio del mismo se puede mostrar u ocultar la ventana de mensajes y el administrador de proyectos.
- **Tools:** A través de este menú se acceden a herramientas complementarias del PWIN32PRO2, la más importante de ellas es el programa PMACTUNINGPRO2 utilizado para realizar la sintonización del sistema. También provee herramientas de prueba y para graficar señales.
- **Window:** Por medio de este menú se accede a la administración y organización de las ventanas activas dentro del programa PWIN32PRO2.
- **Help:** Dentro de este menú se puede encontrar información respecto de la Turbo PMAC2 y provee dos herramientas de diagnóstico para motores y programas de movimiento.

## APÉNDICE C: PMACTUNINGPRO2: PROGRAMA DE SINTONIZACIÓN

### DESCRIPCIÓN BÁSICA DE COMANDOS

La ventana del programa PMACTUNINGPRO2 se detalla en la FIGURA C-1. En la misma se puede ver tres partes principales: la barra de menús, la barra de iconos y la barra de estado.

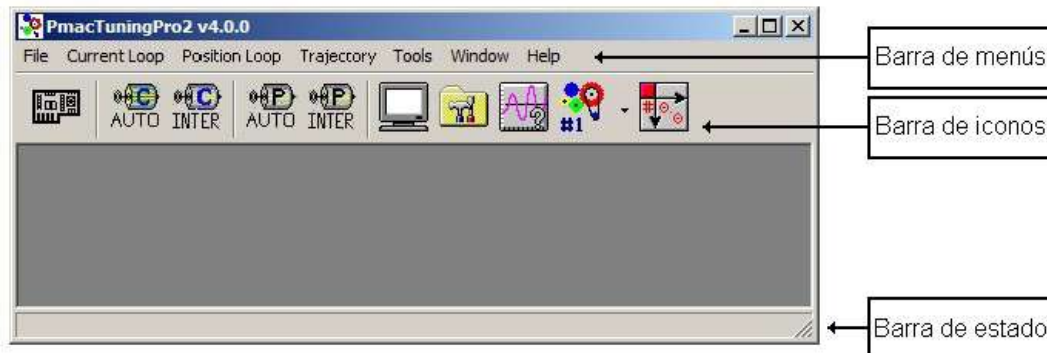


FIGURA C-1: Ventana de presentación PMACTUNINGPRO2

En la barra de menús encontramos los siguientes ítems:

- **File:**
  - **Select Pmac:** Por medio de este comando el usuario puede elegir una placa PMAC para sintonizar o para realizar un test de funcionalidad ad por medio del botón “Test”. Una vez seleccionada la placa, se escribe en un archivo INI el número de la misma, de tal manera que la siguiente vez que se ejecute el programa será éste el dispositivo que quedará seleccionado automáticamente.
  - **Open:** Permite la apertura de archivos Ivar y Pmac, como también cualquier archivo de texto.
  - **Save:** Guarda los cambios realizados en el archivo abierto con el comando “Open”.
  - **Save As:** Permite salvar un archivo de texto en algunos de los formatos mencionados en el comando “Open”.
  - **Print:** Imprime el archivo abierto.
  - **Exit:** Permite salir del programa y salvar automáticamente los cambios en la configuración en un archivo INI.
- **Current Loop:**



- **Auto Tuning:** A través de este comando el sistema realiza un ajuste de las ganancias del lazo de corriente. Resulta útil para tener un punto de partida y luego utilizar el comando interactivo para afinar estas ganancias.
- **Interactive:** Permite hacer un ajuste de las ganancias en forma interactiva y ejecutar una prueba con el fin de corroborar que las ganancias seleccionadas satisfacen lo requerido.
- **Position Loop:**
  - **DAC Calibration:** Para efectuar la calibración del convertor DAC se accede al menú “Position Loop” y luego al ítem “DAC Calibration”, tal como se muestra en la FIGURA C-2.

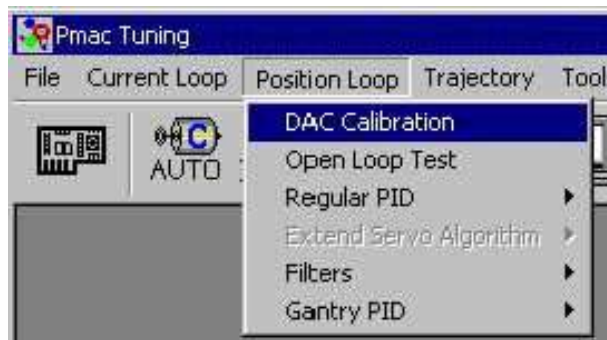


FIGURA C-2: Menú de calibración convertor D/A

El propósito de esta función es la de permitir al usuario determinar el valor de calibración del convertor digital/analógico e implementarlo. Para realizar dicha calibración se baja y se ejecuta en la Turbo PMAC2 un sencillo programa PLC que determina el valor óptimo.

Una vez que implementamos este valor, el mismo es guardado en una variable I, más específicamente en la variable Ix29.

La mencionada calibración se realiza de acuerdo a los parámetros que han sido ingresados en la ventana de configuración, los cuales son:

- Number of test iterations: fija el número de movimientos hacia adelante y hacia atrás realizados a lazo abierto. Este valor puede ser de 1 a 10.
- Calibration step size: indica cada cuanto incrementar el dato digital enviado al convertor.

Una vez definidos estos valores, por medio del botón “Begin Calibration” en la ventana de la FIGURA C-3, se comienza el procedimiento de calibración.



FIGURA C-3: Variables de calibración

Finalizado el test, el cual depende del número de iteraciones, de la fricción del motor y de la banda muerta a lazo abierto, se muestra una ventana donde se encuentran el valor presente y el sugerido para la calibración del DAC, como también el valor de banda muerta en bits, ésta última se guarda en la variable lx65. Un ejemplo de esto puede verse en la FIGURA C-4.

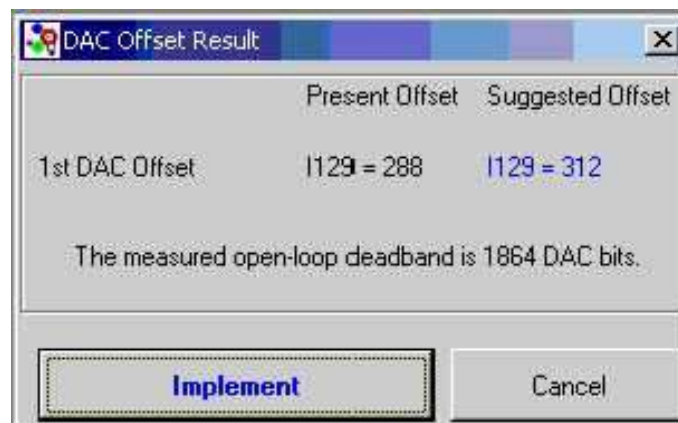


FIGURA C-4: Resultados de la calibración

En la FIGURA C-5 se puede ver una ilustración gráfica del offset de calibración.

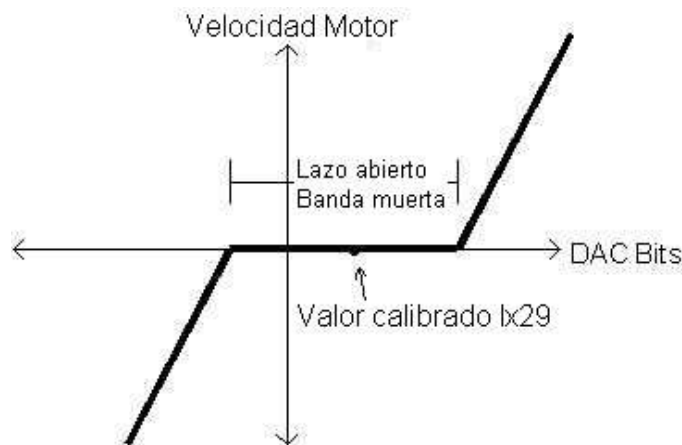


FIGURA C-5: Ilustración gráfica del offset

- **Open Loop Test:**

Para realizar este test se accede a través del menú “Position Loop” y seguidamente la opción “Open Loop Test”, como se indica en la FIGURA C-6.

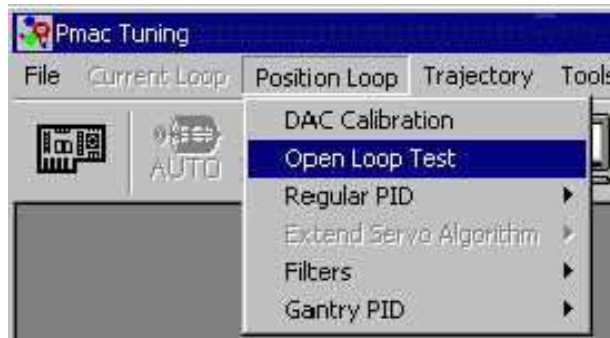


FIGURA C-6: Test a lazo abierto

Esta función permite realizar una secuencia repetitiva de movimientos a lazo abierto de acuerdo a los valores establecidos en las siguientes variables de la ventana de configuración que se presenta en la FIGURA C-7.

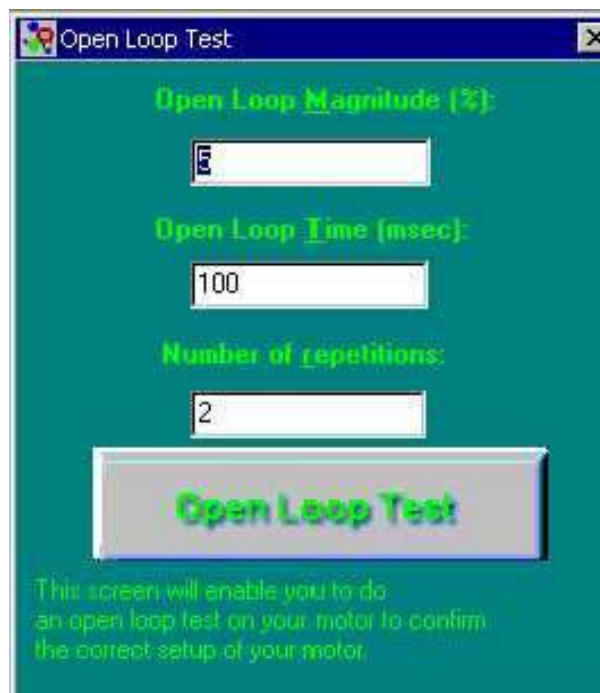


FIGURA C-7: Parámetros del test a lazo abierto

- **Open Loop Magnitude (%):** es el máximo voltaje en una dirección para el movimiento a lazo abierto. Está expresado como un porcentaje del valor almacenado en la variable Ix69, la cual contiene el valor máximo permitido

para la salida, expresado en DAC Bits. Cuyo rango va de 0 a 32.767 que corresponde de 0 a  $\pm 10V$ .

- Open Loop Time (msec): especifica el tiempo de duración del test.
- Number of Repetitions: fija el número de repeticiones de movimiento.

El test puede finalizar si el límite de velocidad del motor en movimiento, cuyo valor se especifica en la variable Ix16, se alcanza o cuando se sobrepasan los límites de posición establecidos, ya sea por hardware o por software (variables Ix13 e Ix14, para la posición positiva y negativa, respectivamente).

- **Regular PID Tuning:** El lazo de control interno que provee la placa Turbo PMAC2 es un PID con filtros notch y pasabajo, cuya configuración se muestra en la FIGURA C-8, y cuyos componentes se describen a continuación.

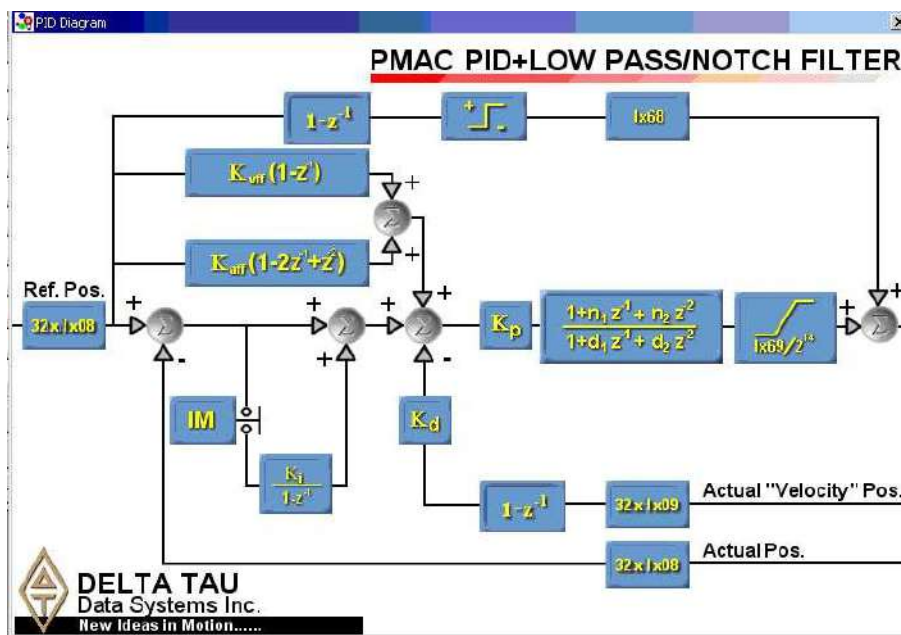


FIGURA C-8: Diagrama PID

Términos del PID: descripciones y consejos.

**Ix30 (Kp) - Proportional Gain:** El incremento de la ganancia proporcional robustece el algoritmo de servo e incrementa la frecuencia natural del sistema a lazo cerrado. Teóricamente aumentando la ganancia proporcional

---

resultará en una mejora en el posicionamiento y en el seguimiento. Pero a menudo en los sistemas reales el aumento de esta ganancia conlleva a una mayor sensibilidad a los ruidos y perturbaciones. El valor por defecto es un valor muy conservador, y es un buen punto de partida.

**Ix31 (Kd) - Derivative Gain:** La ganancia derivativa funciona como un amortiguador. A mayor ganancia mayor es el efecto de amortiguamiento. Esta ganancia previene el sobrepico, pero hace más lento al sistema. Además, en un sistema digital el ruido de cuantización se amplifica cuando la ganancia derivativa se aplica y en movimientos lentos (cuentas por segundo) el ruido en el sistema puede contribuir significativamente en el error. Si el usuario salta la sintonización automática, es bueno comenzar la sintonía con un valor bajo de ganancia derivativa. El valor por defecto es un valor muy conservador, y es un buen punto de partida.

**Ix32 (Kvff) - Velocity FF (feed forward) Gain:** La ganancia de feed forward a la velocidad ayudará al sistema a reducir el error en estado estacionario. Si se va a utilizar esta ganancia es conveniente usar también la ganancia derivativa. A menudo, el resultado óptimo se obtiene al establecer un valor igual al de la ganancia derivativa.

**Ix33 (Ki) - Integral Gain:** La ganancia integral actúa para corregir el error de seguimiento acumulado en el sistema. Es particularmente eficaz para contrarrestar el error en estado estacionario causado por la fricción. Sin embargo, por razones numéricas (ganancias altas saturarán numéricamente al lazo del servo) y concerniente a la estabilidad del servo no se aconseja valores excesivamente alto de ganancia integral. Se recomienda comenzar la sintonización con valores bajos e ir viendo las mejoras. Si el usuario no desea la acción integral, ésta debe fijarse en 0.

**Ix34 (IM) - Integral Mode:** Estableciendo un valor igual a 0 el integrador actúa todo el tiempo, si el valor es igual a 1 el integrador solamente actuará cuando la velocidad comandada sea 0.

**Ix35 (Kaff) - Acceleration FF (feed forward) Gain:** Esta ganancia ayuda al esfuerzo de seguimiento del sistema. La determinación de esta ganancia involucra algunos cálculos complejos, pero hay una manera intuitiva de aplicar esta ganancia. Si la gráfica de velocidad (probar el movimiento parabólica o trapezoidal para chequear la velocidad de seguimiento) del sistema muestra un mal seguimiento en la aceleración o desaceleración, el aplicar esta ganancia será de ayuda.

**Ix69 - DAC Limit:** Si el amplificador posee más potencia que la que el motor puede manejar, es crucial limitar el DAC de tal manera que no se exceda en la cantidad de corriente enviada al motor, evitando que éste se queme.

**Ix60 - Servo Cycle Extension:** Si el movimiento de la carga se realiza muy lentamente, es decir, si la cuenta del encoder relativas al ciclo del servo es baja todo el tiempo, puede ser una buena idea extender el ciclo del servo. Al aumentar el ciclo del servo la Turbo PMAC2 tratará de cerrar los lazos con menor frecuencia. Esto es deseable para que la placa utilice menos tiempo de cálculo para el servo, reservando este poder de cálculo para la ejecución de PLCs o para otras tareas. El valor por defecto es 0, y esto hará que el lazo se actualice en cada interrupción. Si se fija esta valor a 1, el lazo del servo se actualizará cada dos interrupciones, y si se fija esta valor en 4, el lazo del servo será actualizado cada 5 interrupciones, y así sucesivamente.

**Ix68 - Friction FF (feed forward) Gain:** Esta ganancia está destinada principalmente para ayudar a superar los errores debido a la fricción mecánica, de acuerdo a la dirección necesaria para ser compensada. Establecer esta ganancia en un valor demasiado alto puede degradar al sistema, se recomienda fijar esta ganancia con moderación.

**Ix11 - Fatal Following Error Limit:** Cuando se excede este valor de error de seguimiento, el motor es desconectado automáticamente.

**Ix08 - Position Scale Factor:** Especifica el factor de escala de multiplicación del registro interno de posición del motor. Para la mayoría de las aplicaciones

este valor es transparente al usuario y no necesita ser cambiado de su valor por defecto.

**Ix09 - Velocity-Loop Scale Factor:** Especifica el factor de escala de multiplicación del registro interno de velocidad del motor. Para la mayoría de las aplicaciones este valor es transparente al usuario y no necesita ser cambiado de su valor por defecto

- **Extended Servo Algorithm:** Este algoritmo es conveniente para sistemas con una dinámica más compleja. Igual que el PID, éste presenta las alternativas de autosintonización o sintonización interactiva. De la misma manera que el algoritmo PID se pueden utilizar todas las trayectorias predefinidas para testear y ajustar el sistema.
- **Filter:** Permite configurar filtros de manera sencilla, un filtro pasa bajos y un filtro notch.
- **Gantry PID:** Esta opción posibilita el uso de dos motores en un sistema gantry. Para lo cual es necesario que el segundo motor sea previamente sintonizado. Luego se puede utilizar la sintonización interactiva o autosintonización para el primero motor; y las pruebas y ajustes utilizando las trayectorias predefinidas en el sistema.
- **Trajectory:** Provee al usuario diversas trayectorias que permitirán utilizarlas para ajustar los distintos parámetros del algoritmo de servo. Entre las cuales se pueden encontrar:

- **Position Step**

- **Position Ramp**

○ **Parabolic Velocity**

Parabolic Move

Move Size (cts):

Move Time (ms):

Kill Motor After Parabolic Move

Move in only one direction

Dwell Time After Move  (ms)

○ **Sinusoidal**

Sinusoidal

Amplitude (cts):

Frequency (Hz):

Number of Repeats:

Kill Motor After Sinusoidal Move

○ **Trapezoidal Velocity**

Trapezoidal Velocity

Move Distance (cts):

Velocity (cts/sec):

Acceleration (cts/msec):

Number of Repeats:

Kill Motor After Trapezoidal Move

Move in only one direction

Dwell Time After Move  (ms)

○ **Sine Sweep**

Sine Sweep

Amplitude (cts):

Start Frequency (Hz):

End Frequency (Hz):

Sweep Time(sec):

Kill Motor After Sinusoidal Move

Sweep Method:  Logarithmic  Linear

Domain:  Time  Frequency

○ **S-Curve Velocity**

S-Curve Velocity

Move Distance (cts):

Velocity (cts/sec):

Acceleration (cts/msec):

Number of Repeats:

Kill Motor After S-Curve Move

Move in only one direction

Dwell Time After Move  (ms)

○ **User Defined**

User Defined

LIN  Spline1  PVT






Kill Motor After Move

Nota: la unidad correcta para el parámetro **Velocity** es [cts/min] y para el parámetro **Acceleration**, que en realidad es tiempo de aceleración, es [msec].



- **Tools:**
  - **Configuration:** El comando permite fijar el rango para el conjunto de variables P y M, el número de PLC's y programas de movimiento. También permite habilitar o deshabilitar los programas PLC.
  - **Terminal:** Activa una ventana por medio de la cual se puede enviar comandos online y consultar variables de la placa Turbo PMAC2.
  - **Strip Plot:** Presenta una ventana que puede ser usada para ver datos en tiempo real de la placa Turbo PMAC2.
  - **Report:** Presenta un reporte de las variables I utilizadas en la sintonización.
  - **Motor Status:** Muestra el estado actual del motor en tiempo real.
  - **Position:** Presenta una ventana donde se muestran los valores de posición de los distintos motores en tiempo real.
- **Window:** Permite administrar la posición y el orden de las ventanas mostradas en el programa.
- **Help:**
  - **PmacTuning Help:** Contiene ayuda relacionada con distintos aspectos del programa.
  - **About:** Versión del programa utilizado.

En la barra de icono encontramos accesos directos a las herramientas más importantes que contiene el programa. Una breve descripción de las mismas se muestra en el TABLA C-2.

Acceso directo		Descripción
	Select Pmac (F3)	Permite seleccionar una placa PMAC para sintonizar o testear una terminal.
	Current Loop AutoTuning	Abre una ventana que permite realizar una autosintonización de un lazo de corriente.
	Current Loop Interactive Tuning	Abre una ventana que permite realizar una sintonización interactiva de un lazo de corriente.
	PID Auto Tuning	Abre una ventana para la autosintonización de un PID.
	PID Interactive Tuning	Abre una ventana la cual permite realizar una sintonización interactiva de un PID.






	Terminal Window	Abre una ventana en la que se puede enviar comandos online y consultar variables PMAC.
	Configuration	Muestra una ventana de configuración donde el usuario puede fijar el rango para las variables P y M, número de PLC, cantidad de programas de movimiento y conectar/desconectar PLC.
	Strip Plot	Abre una ventana que puede ser usada para ver datos de la PMAC en tiempo real y graficarlos.
	Motor Select	Permite elegir el motor para realizarle los test y la sintonización.
	Position Window	Abre una ventana donde se puede ver el valor actual de posición en tiempo real.

TABLA C-2: Descripción de accesos directos

La barra de estado muestra información relacionado con el comando que se está utilizando.

---

## APÉNDICE D: ALGORITMOS PERSONALIZADOS DE CONTROL

Ésta placa permite la instalación y ejecución automática de algoritmos escritos por un usuario. Una alternativa que puede ser utilizada si el algoritmo PID provisto por la placa no es adecuado para obtener el rendimiento requerido en nuestro sistema. Alternativamente, estos algoritmos personalizados pueden usarse para otras tareas.

Hay dos métodos para desarrollar algoritmos personalizados.

1. Método de ensamblado: Se utiliza un ensamblador cruzado Motorola para la familia DSP56300. Este método genera un código que es más eficiente y más compacto. Sin embargo se requieren conocimientos avanzados del lenguaje ensamblador.
2. Método compilado denominado "Open Servo": donde la programación del lazo de control se realiza utilizando un lenguaje de alto nivel, compilado por medio del programa PEWIN32PRO2. Este método de compilación es sencillo de usar y muy flexible, permitiendo el uso de matemática de punto flotante.

Para aspectos más avanzados en la programación de los lazos de control, se puede consultar el manual [10]. A continuación se darán los aspectos básicos para entender la realización de un algoritmo de control a través del método "Open Servo".

### Variables y Arrays

- VARIABLES L: son variables puntero a un registro corto de 24 bits, tratadas como valores enteros.
- VARIABLES F: son variables puntero a un registro largo de 48 bits. Si la definición de la variable F es un formato L (F1->L:\$10F0), el registro es accedido como un registro de punto flotante de 48 bits. Si la definición de la variable F es en el formato de variable D (F2->D:\$88), el registro es accedido como un entero de 48 bits con signo, pero la conversión a o desde la placa en el formato de punto flotante de 48 bits es realizada automáticamente, por lo que puede ser usada en matemática de punto flotante.
- ARRAYS DE VARIABLES: estos arrays de variables trabajan con las variables de la placa (variables I, P, Q y M). El número del índice del array está ubicado entre paréntesis y especifica el número de variables para un tipo específico de variable.
- ARRAYS DE REGISTROS: este trabaja con las variables L y F del compilador. Estos arrays deben ser declarados al compilador antes del comienzo del algoritmo

“Open Servo”. El número del índice del array deber estar localizado entre corchetes y especifica la dirección del Offset desde el comienzo desde el comienzo del array declarado.

En el manual [10] puede encontrarse información adicional para un uso más avanzado en el manejo de arrays.

## Funciones

- **MATEMÁTICAS:** estas funciones matemáticas solo pueden usarse en llevar como argumento una expresión entera.
  - SIN (seno)
  - COS (coseno)
  - TAN (tangente)
  - ASIN (arco seno)
  - ACOS (arco coseno)
  - ATAN (arco tangente)
  - ATAN2 (arco tangente)
  - ABS (valor absoluto)
  - INT (parte entera)
  - EXP (exponencial)
  - LN (logaritmo natural)
  - SQRT (raiz cuadrada)
- **ITOF(valor o variable)** convierte un valor entero a uno de punto flotante. Debe llevar como argumento una expresión entera.

ITOF(valor o variable)
- **FTOI:** (float to integer), convierte un valor de punto flotante a un entero. Debe llevar como argumento una expresión de punto flotante.

FTOI (valor o variable)
- **FLIMIT:** limita el valor de una variable de manera positiva y negativa. En el argumento debe ir el valor o variable a limitar y el límite.

FLIMIT({valor},{límite})      si valor > límite: retorna el valor de límite

si valor < – límite: retorna el valor de – límite  
en cualquier otro caso retorna el valor indicado

- MTRNUM: retorna el número de motor en el que se está ejecutando el algoritmo de control. El número es retornado como un valor entero. No lleva argumento.

## Operadores

Estos operadores pueden ser utilizados en declaraciones donde existan tanto valores de punto flotante como enteros.

- + (suma)
- - (resta)
- x (multiplicación)
- / (división)
- % (módulo, resto)
- & (AND)
- | (OR)
- ^ (XOR)

## Comparadores

Estos comparadores pueden ser usados tanto en declaraciones de punto flotante como enteros, a excepción de los comparadores X y X, que sólo pueden utilizarse en declaraciones de punto flotante.

- = (igual a)
- > (mayor que)
- < (menor que)
- ~ (aprox. igual a)
- != (distinto a)
- !> (no mayor que, menor o igual)
- !< (no menor que, mayor o igual)
- !~ (distinto a aprox. Igual a)

## Comandos

- OPEN SERVO: indica al compilador que las líneas de códigos siguientes pertenecen a un algoritmo escrito por usuario para un lazo de control y que deben ser compiladas como tal y sobrescribir el espacio reservado en memoria para la ubicación del algoritmo escrito por usuario.
- CLEAR: su función es la de borrar cualquier código que haya sido escrito anteriormente. El hecho de que el comando OPEN SERVO borre todo el código anterior hace que este comando no sea necesario y su uso se opcional.
- CLOSE: indica al compilador la finalización del algoritmo de control, y es el último comando que debe figurar en el código.
- COPYREG: este comando copia 5 claves del registro del motor sobre el cual se está ejecutando el algoritmo en cinco variables P consecutivas, las cuales se pueden utilizar para realizar cualquier cálculo que se necesite. Esto le da la ventaja al usuario de usar estos valores sin necesidad de conocer en que posición del registro se encuentran. Las cinco claves copiadas por este comando son:
  - Velocidad actual
  - Velocidad deseada
  - Error de seguimiento
  - Posición actual
  - Posición deseada.

La sintaxis para este comando es: COPYREG {variable P}, donde {variable P} especifica el número de la primer variable P donde será copiado el valor de la velocidad actual y los valores siguientes copiarán las claves mencionadas en el párrafo anterior.
- RETURN: toma el valor entero que está en el argumento y lo guarda en la memoria de la placa Turbo PMAC2 para ser usado como valor de salida para el DAC. Si el valor es de punto flotante debe convertirse en un entero con la función FTOI. La sintaxis para este comando es RETURN (valor), donde valor debe ser un número entero.
- SAVE: permite grabar información de manera permanente en la memoria flash no volátil de la placa Turbo PMAC2. El comando debe tipearse en la ventana Terminal del programa PWIN32PRO2. Es un comando de ejecución online.

- DEFINE UBUFFER: se utiliza para asignar memoria de datos extra. La sintaxis para este comando es: DEFINE UBUFFER {valor}, donde {valor} especifica la cantidad de memoria extra en formato decimal.

### Escritura de un algoritmo “Open Servo”

En principio el algoritmo puede ser escrito en cualquier editor de texto, aunque es recomendable realizarlo en el editor que provee el programa PEWIN32PRO2. Al cual se accede por medio del menú del mencionado programa: File > New File. Una vez realizada esta acción se abre el editor, como se muestra en la FIGURA 4-10.

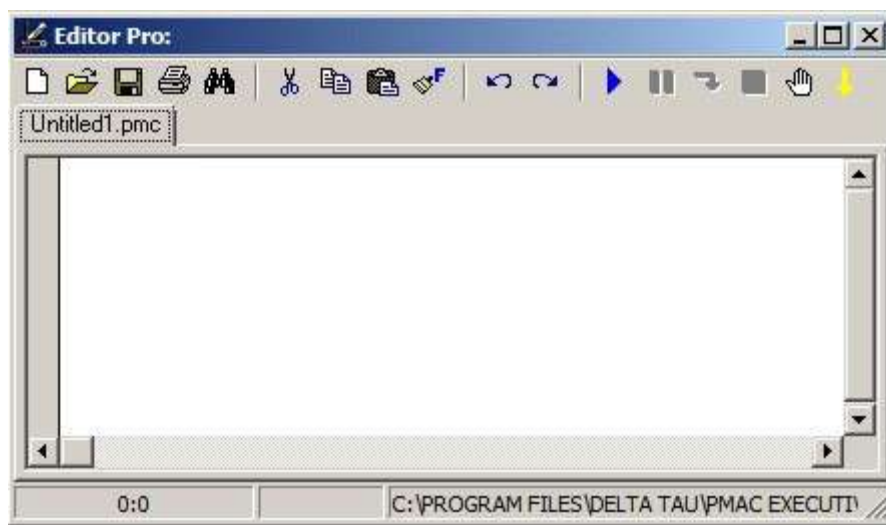



FIGURA 4-10: Editor de texto para desarrollo de algoritmos de control

Como puede observarse, éste contiene una barra de iconos donde se encuentran las funciones habituales de cualquier programa informático, a excepción de los últimos 6 iconos y fundamentalmente el último  (Download) que es una rutina que permite cargar a la memoria de la placa Turbo PMAC2 el código de control desarrollado.

De manera que una vez finalizado y depurado el algoritmo se procederá a bajar el código, utilizando la mencionada rutina, con lo cual automáticamente se reconocerá que es un algoritmo de control, se compilará y se grabará un código máquina en la memoria de la placa.

Se debe mencionar que el procedimiento citado anteriormente solamente almacena el algoritmo desarrollado en una memoria RAM volátil, sobrescribiendo el código existente en el espacio reservado para la escritura de algoritmos

personalizados. Al ser una memoria volátil este código permanecerá hasta que el controlador se reinicie. Si queremos que el algoritmo permanezca de manera definitiva debemos escribirlo en la memoria flash del controlador. Para ello deberemos utilizar el comando SAVE, para lo cual debemos escribir este comando en la ventana Terminal del programa PWIN32PRO2. De no tener abierta la mencionada ventana, la misma se puede activar por medio del menú de opciones View > Terminal con lo cual se abrirá la ventana mostrada en la FIGURA 4-11, al final de la misma se deberá tipear el comando SAVE y esperar las indiciones del programa. Una vez finalizada la grabación del código, este ya estará listo para usarse.

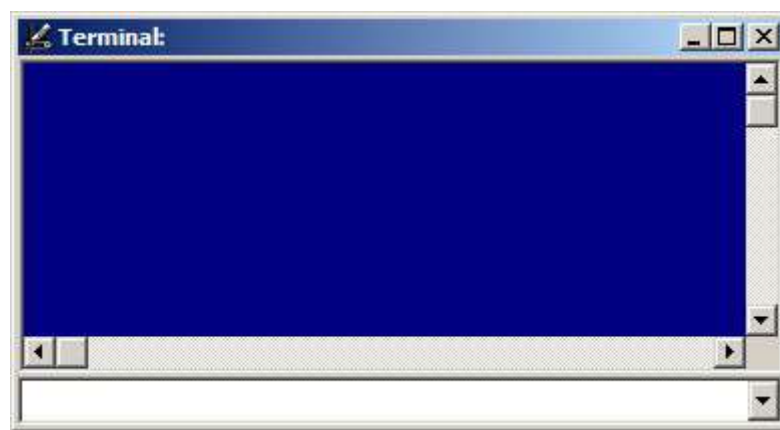


FIGURA 4-11: Terminal para la ejecución online de comandos

Ahora solo resta activar el motor o los motores sobre los cuales se quiere aplicar el algoritmo de control, esto se hace seteando la variable lxx00 de cada motor en un valor igual a 1.

Finalmente se debe indicar a la placa que utilice el algoritmo personalizado. Esta orden se realiza seteando la variable lxx59 de cada motor, en un valor igual a 1.

A continuación se presenta un algoritmo de control realizado utilizando el método denominado Open Servo, en la FIGURA 4-12 se detalla el diagrama de bloques del mencionado algoritmo.

Donde:

$$Kp = lxx30$$

$$Kd = lxx31$$

$$Kvff = lxx32$$

$$Ki = lxx33$$

$$IM = lxx34$$



$K_{aff} = I_{xx35}$

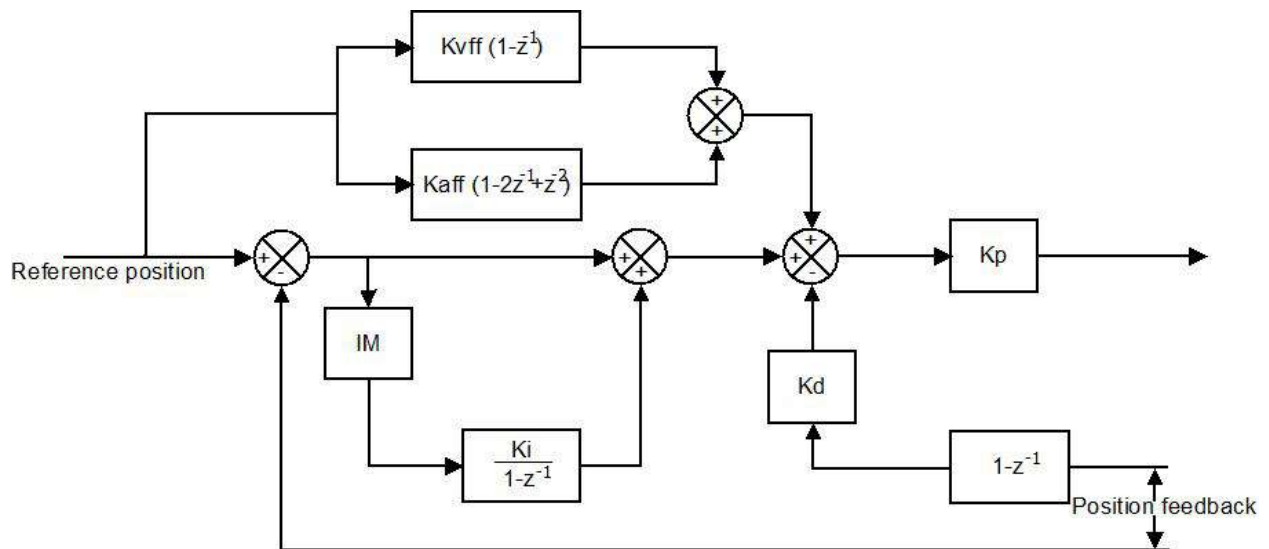


FIGURA 4-12: Diagrama de bloques del algoritmo PID

#### ALGORITMO DE CONTROL PID

**; declaración de constantes**

#define K16 0.000015259

#define K128 0.0078125

#define K23 0.000000119

**;uso de variables L para un rápido acceso a las variables I**

#define Ix08 L1

L1->Y:(R1-\$27)

#define Ix09 L2

L2->Y:(R1-\$14)

#define Ix30 L3

L3->Y:(R1-\$17)

#define Ix31 L4

L4->X:(R1-\$1E)

#define Ix32 L5

L5->X:(R1-\$21)

#define Ix33 L6

L6->X:(R1-\$11)

#define Ix35 L7

L7->Y:(R1-\$1D)

```
#define Ix63 L8
L8->Y:(R1-$11)
#define Ix69 L9
L9->Y:(R1-2)
#define STATUS L10
L10->X:(R1+0)
#define IPOS F1
F1->L:(R1-$12)
#define PDVEL F2
F2->L:(R1-$29)
#define AVEL P0
#define DVEL P1
#define FE P2
#define APOS P3
#define DPOS P4
#define DACOUT P5
; inicio del algoritmo de control
OPEN SERVO
CLEAR
COPYREG P0
If (STATUS&$12000 = $12000 Or STATUS&$10000 = 0)
IPOS = FLIMIT(ITOF(Ix33)*FE*K23+IPOS, ITOF(Ix63)*ITOF(Ix08)*2)
DACOUT = FLIMIT(ITOF(Ix30)*K16 * (FE + K128 *(ITOF(Ix32) * DVEL + ITOF(Ix35)
* (DVEL - PDVEL) - ITOF(Ix31) *AVEL) + IPOS), ITOF(Ix69))
PDVEL = DVEL
RETURN(FTOI(DACOUT))
CLOSE
```

## REFERENCIAS

### PUBLICACIONES

[1] A. Casquero, R. Hecker, G. Flores, D. Vicente, “Diseño de un dispositivo de posicionamiento de precisión. Parte I: Especificaciones y procesos de diseño”, Primer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, Octubre del 2008.

[2] G. Flores, R. Hecker, D. Vicente, A. Casquero, “Diseño de un dispositivo de posicionamiento de precisión. Parte II: Diseño CAD/CAE”, Primer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, Octubre del 2008.

[3] A. Casquero, R. Hecker, D. Vicente, G. Flores, “Control de un Posicionador Lineal para Máquinas Herramientas de Alta Velocidad”, San Juan, Noviembre del 2010.

### MANUALES

[4] FESTO, Sistemas de Posicionamiento Eléctrico. Motores Paso a Paso/Servomotores, Septiembre del 2005.

[5] FESTO, Smart Electromotor Controller, Fitting and Installation, 2003.

[6] DELTA TAU, Hardware Manual, Adv 400 Conexions, June 2006.

[7] DELTA TAU, User Manual, Advantage 400, November 2007.

[8] DELTA TAU, Integration Manual, Adv 400 Integration Manual, November 2007.

[9] DELTA TAU, Software Manual, Adv 400 Programming, November 2007.

[10] DELTA TAU, User Manual, Turbo PMAC, October 2006.

[11] DELTA TAU, Software Reference Manual, Turbo PMAC/PMAC2, November 2008.

[12] HEIDENHAIN, Instrucciones de Montaje, Febrero del 2007.

[13] HEIDENHAIN, Linear Encoders for Numerically Controlled Machine Tools, July 2010.

[14] DELTA TAU, Software Reference Manual, Pwin32, October 2004.

[15] DELTA TAU, Software Manual, Pwin32 Pro2, September 2005.

#### INTERNET

[16] <http://www.deltatau.com>

[17] <http://www.festo.com>