

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. Contexto	1
1.2. Técnicas de dip coating	2
1.3. Dip coaters en el mercado	3
1.4. Objetivos y alcance	5
1.4.1. Objetivos	5
1.4.2. Alcance	5
2. Introducción específica	7
2.1. Estudio preliminar	7
2.2. Circuitos integrados Trinamic	8
2.2.1. Driver TMC5130	9
2.3. Interfaz de usuario	11
2.4. Estructura mecánica	12
2.5. Sistema electrónico propuesto	14
3. Diseño e Implementación	17
3.1. Hardware	17
3.1.1. Diseño basado en módulos de hardware libre	17
3.1.2. Etapa de alimentación	17
3.1.3. Etapa de comunicación	17
3.1.4. Driver TMC5130	19
3.1.5. Fabricación	19
3.2. Firmware	21
3.2.1. Capas de abstracción	21
3.2.2. Módulos principales de software	23
Control de movimientos	23
Interfaz usuario-máquina	25
Pantalla táctil	28
Comandos Json	28
Parámetros de calibración	28
3.3. Estructura mecánica	29
3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecaniza-	29
do CNC	29
Etapa CAD	29
Etapa CAM	30
3.3.2. Modelos 3D y real	31
4. Ensayos y resultados	35
4.1. Pruebas funcionales de hardware y rediseño	35
4.1.1. Comunicación con periféricos	35

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. Contexto	1
1.2. Técnicas de dip coating	2
1.3. Dip coaters en el mercado	3
1.4. Objetivos y alcance	5
1.4.1. Objetivos	5
1.4.2. Alcance	5
2. Introducción específica	7
2.1. Estudio preliminar	7
2.2. Circuitos integrados Trinamic	8
2.2.1. Driver TMC5130	9
2.3. Interfaz de usuario	11
2.4. Estructura mecánica	12
2.5. Sistema electrónico propuesto	14
3. Diseño e Implementación	17
3.1. Hardware	17
3.1.1. Diseño basado en módulos de hardware libre	17
3.1.2. Etapa de alimentación	17
3.1.3. Etapa de comunicación	17
3.1.4. Driver TMC5130	19
3.1.5. Fabricación	19
3.2. Firmware	21
3.2.1. Capas de abstracción	21
3.2.2. Módulos principales de software	23
Control de movimientos	23
Interfaz usuario-máquina	25
Pantalla táctil	28
Comandos Json	28
Parámetros de calibración	28
3.3. Estructura mecánica	29
3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecaniza-	29
do CNC	29
Etapa CAD	29
Etapa CAM	30
3.3.2. Modelos 3D y real	31
4. Ensayos y resultados	35
4.1. Pruebas funcionales de hardware y rediseño	35
4.1.1. Comunicación con periféricos	35

IV

4.2. Pruebas funcionales firmware y rediseño 36

4.2.1. Tiempo de ejecución de movimientos 36

4.3. Calibración del equipo 38

4.3.1. Desplazamiento lineal y micro pasos 38

4.4. Caso de prueba 40

4.5. Prueba de campo con personal capacitado 40

5. Conclusiones 43

5.1. Resultados obtenidos 43

5.2. Próximos pasos 43

Bibliografía 45

IV

4.2. Pruebas funcionales firmware ! ! ! ! ! 38

4.2.1. Tiempo de ejecución de movimientos 38

4.3. Calibración del equipo 40

4.3.1. Desplazamiento lineal y micro pasos 40

4.4. Caso de prueba 41

4.5. Prueba de campo con personal capacitado 41

5. Conclusiones 45

5.1. Resultados obtenidos 45

5.2. Próximos pasos 45

Bibliografía 47

Índice de figuras

1.1. Centro Tecnológico FUNINTEC.	2
1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo ¹	2
1.3. Films de dióxido de titanio TiO ₂ ²	3
1.4. Equipo de la empresa Kibron.	4
1.5. Equipos de la empresa Biolin Scientific.	4
1.6. Equipo de la empresa Bungard.	4
2.1. Espesor vs velocidad ³	7
2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130 ⁴	9
2.3. Diagrama en bloques TMC5130 ⁵	10
2.4. Función stallguard2 ⁶	10
2.5. Función coolstep ⁷	11
2.6. Guía Lineal IGUS ⁸	13
2.7. Fresadora Fagor GVC 600 ⁹	14
2.8. Esquema de equipo propuesto.	15
3.1. Módulo de entrada.	18
3.2. Conversor UART-USB.	18
3.3. Clock para el CI TMC5130.	19
3.4. CI TMC5130.	20
3.5. Modelo 3D Kicad.	20
3.6. Placa fabricada MAYER SRL.	21
3.7. Capas de abstracción de software.	22
3.8. Software TMCL-IDE.	23
3.9. Configuración de funcionalidades stallguard2 y coolstep.	24
3.10. Configuración de rampa de seis puntos.	24
3.11. Comandos de movimientos.	26
3.12. Comandos de control.	27
3.13. Lectura de registros del driver TMC5130.	27
3.14. Comandos DOWN descartado por equipo en funcionamiento.	28
3.15. Comandos de STOP procesado.	28
3.16. Unidades.	29
3.17. Pieza personalizada soporte de carro.	30
3.18. Piezas personalizada soporte de estructura superior.	30
3.19. Estrategias de mecanizado en software Bodcad.	31
3.20. Piezas fabricadas en centro de mecanizado.	32
3.21. Modelo 3D.	33
3.22. Primer prototipo dip coater TECSCI.	34
4.1. Datagrama de 40 bits.	35
4.2. Comparación de tiempos teóricos y registrados.	37
4.3. Error relativo porcentual.	38
4.4. Comparador digital Asimeto.	39

Índice de figuras

1.1. Centro Tecnológico FUNINTEC.	2
1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo ¹	2
1.3. Films de dióxido de titanio TiO ₂ ²	3
1.4. Equipo de la empresa Kibron.	4
1.5. Equipos de la empresa Biolin Scientific.	4
1.6. Equipo de la empresa Bungard.	4
2.1. Espesor vs velocidad ³	7
2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130 ⁴	9
2.3. Diagrama en bloques TMC5130 ⁵	10
2.4. Función stallguard2 ⁶	10
2.5. Función coolstep ⁷	11
2.6. Guía Lineal IGUS ⁸	13
2.7. Fresadora Fagor GVC 600 ⁹	14
2.8. Esquema de equipo propuesto.	15
3.1. Módulo de entrada.	18
3.2. Conversor UART-USB.	18
3.3. Clock para el CI TMC5130.	19
3.4. CI TMC5130.	20
3.5. Modelo 3D Kicad.	20
3.6. Placa fabricada MAYER SRL.	21
3.7. Capas de abstracción de software.	22
3.8. Software TMCL-IDE.	23
3.9. Configuración de funcionalidades stallguard2 y coolstep.	24
3.10. Configuración de rampa de seis puntos.	24
3.11. Comandos de movimientos.	26
3.12. Comandos de control.	27
3.13. Lectura de registros del driver TMC5130.	27
3.14. Comandos DOWN descartado por equipo en funcionamiento.	28
3.15. Comandos de STOP procesado.	28
3.16. Unidades.	29
3.17. Pieza personalizada soporte de carro.	30
3.18. Piezas personalizada soporte de estructura superior.	30
3.19. Estrategias de mecanizado en software Bodcad.	31
3.20. Piezas fabricadas en centro de mecanizado.	32
3.21. Modelo 3D.	33
3.22. Primer prototipo dip coater TECSCI.	34
4.1. Datagrama de 40 bits.	35
4.2. Ensayo sobre terminales SPL.	36
4.3. Comando de lectura sobre registro 0x2D.	37
4.4. Ensayo sobre terminales SPL.	37

VI

4.5.	Ensayo de desplazamiento lineal.	40
4.6.	Ensayo completo en laboratorio.	41
4.7.	Ensayo con wafer de silicio.	42

VI

4.5.	Ensayo sobre terminales SPI.	37
4.6.	Comparación de tiempos teóricos y registrados.	39
4.7.	Error relativo porcentual.	39
4.8.	Comparador digital Asimeto.	40
4.9.	Ensayo de desplazamiento lineal.	41
4.10.	Ensayo completo en laboratorio.	42
4.11.	Ensayo con wafer de silicio.	43

Índice de tablas

1.1. Dip coaters en el mercado	5
2.1. Comparación Stone	12
4.1. Ensayo de tiempo en desplazamientos	37
4.2. Ensayo de desplazamiento	39
4.3. Ensayo de desplazamiento	41

Índice de tablas

1.1. Dip coaters en el mercado	5
2.1. Comparación Stone	12
4.1. Ensayo de tiempo en desplazamientos	38
4.2. Ensayo de desplazamiento	42
4.3. Ensayo de desplazamiento	42

Capítulo 4

Ensayos y resultados

4.1. Pruebas funcionales de hardware y rediseño

En el presente capítulo se explican los ensayos realizados sobre el prototipo de equipo dip coater, se presentan y analizan los resultados obtenidos y se introducen posibles cambios para próximas versiones.

4.1.1. Comunicación con periféricos

El presente ensayo se realizó para verificar la comunicación entre el microcontrolador ESP32 y el CI TMC5130, como se mencionó en el capítulo 3 dicha comunicación se establece a través del protocolo SPI.

El paquete de datos está definido por un datagrama de 5 bytes, el primer byte define la dirección del registro y los 4 bytes restantes representan el valor. La comunicación con el CI TMC5130 es constante, al encender el equipo se realiza una configuración inicial en donde se escriben todos los registros y luego se realizan operaciones de lectura y escritura para conocer el estado del CI y accionar diferentes tipos de movimientos.

A continuación en la figura 4.1 se observa la estructura de datos para leer y escribir registros.

SPI DATAGRAM STRUCTURE																													
MSB (transmitted first)														40 bit								LSB (transmitted last)							
39 ... 0																													
→ 8 bit address														← → 32 bit data															
← 8 bit SPI status														31 ... 0															
→ to TMC5130A RW + 7 bit address ← from TMC5130A 8 bit SPI status														8 bit data				8 bit data				8 bit data				8 bit data			
39 ... 32														31 ... 24				23 ... 16				15 ... 8				7 ... 0			
w 38 32														31 28 27 24				23 20 19 16				15 12 11 8				7 4 3 0			
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3														2 2 2 2 2 2 2 2 2 2				1 1 1 1 1 1 1 1 1 1				1 1 1 1 1 1 1 1 1 1				9 8 7 6 5 4 3 2 1			
9 8 7 6 5 4 3 2 1														2 1 0 9 8 7 6 5 4 3				3 2 1 0 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0				9 8 7 6 5 4 3 2 1 0							

FIGURA 4.1. Datagrama de 40 bits.

Las operaciones de lectura y escritura tienen una diferencia, **representada** por el bit **mas** significativo de la trama de datos, es decir el bit 39. Cuando la operación es de lectura, y primer byte que representa la dirección del **registro** no sufre **alteración**. Cuando la operación es de escritura, **hay que** establecer en 1 el bit de la

Capítulo 4

Ensayos y resultados

4.1. Pruebas funcionales de hardware

En el presente capítulo se explican los ensayos realizados sobre el prototipo de equipo dip coater, se presentan y analizan los resultados obtenidos y se introducen posibles cambios para próximas versiones.

4.1.1. Comunicación con periféricos

El presente ensayo se realizó para verificar la comunicación entre el microcontrolador ESP32 y el CI TMC5130, como se mencionó en el capítulo 3 dicha comunicación se establece a través del protocolo SPI.

El comunicación con el CI TMC5130 está definida por un datagrama de 5 bytes, el primer byte define la dirección del registro y los 4 bytes restantes representan el valor del registro.

A continuación en la figura 4.1 se observa la estructura de datos para leer y escribir registros.

SPI DATAGRAM STRUCTURE																																																												
MSB (transmitted first)																40 bit								LSB (transmitted last)																																				
39 0																																				
→ 8 bit address																← → 32 bit data																																												
← 8 bit SPI status																																																												
39 .. 32																31 .. 0																																												
→ to TMCS130A RW + 7 bit address ← from TMCS130A 8 bit SPI status																8 bit data								8 bit data								8 bit data								8 bit data																				
39 / 38 .. 32																31 .. 24								23 .. 16								15 .. 8								7 .. 0																				
w	38			32			31			28			27			24			23			20			19			16			15			12			11			8			7			4			3			2			1			0		
9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0											

FIGURA 4.1. Datagrama de 40 bits.

Las operaciones de lectura y escritura tienen una diferencia, **que se ve representada** por el bit **más** significativo de la trama de datos, es decir el bit 39. Cuando la operación es de lectura, y primer byte que representa la dirección del registro no sufre **alteración**. Cuando la operación es de escritura, **se debe** establecer en 1 el bit de la posición 39. Por ejemplo, si se pretende escribir un valor en el registro [0x22], el primer byte del datagrama debería ser [0x22 + 0x80 = 0xA2], sumar [0x80] representa poner en 1 el primer bit del byte mas significativo del datagrama.

posición 39. Por ejemplo si queremos escribir un valor en el registro 0x22, el primer byte del datagrama debería ser $0x22 + 0x80 = 0xA2$, sumar 0x80 representa poner en 1 el primer bit del byte mas significativo del datagrama.

Para realizar el ensayo se utilizó un analizador lógico USB conectado a la placa electrónica, específicamente sobre los terminales que establecen la comunicación SPI entre el microcontrolador y el CI TMC5130. Se puede observar en la siguiente figura el banco de pruebas del ensayo.

El procedimiento realizado fue el siguiente:

1. Conectarse al equipo dip coater con software Putty.
2. Abrir el software del analizador lógico y comenzar registro de datos.
3. Ejecutar comando de lectura del registro 0x2D.
4. Ejecutar comando de escritura del registro 0x2D con valor 100.
5. Ejecutar nuevamente comando de lectura de registro 0x2D y verificar el valor ingresado en el ítem anterior.

Se observan a continuación los datagramas capturados en el software del analizador lógico.

Con este ensayo se pudo validar la correcta comunicación entre el microcontrolador y el CI TMC5130 para las operaciones de lectura y escritura de datos.

4.2. Pruebas funcionales firmware y rediseño

4.2.1. Tiempo de ejecución de movimientos

El ensayo se realizó para verificar los parámetros que definen el desplazamiento de la muestra, es decir para verificar que las velocidades y aceleraciones que definen movimientos sean similares a las que surgen del cálculo teórico.

En el capítulo 3 se detalló la configuración de la rampa de seis puntos que define un movimiento y se mostró la configuración de los parámetros para obtener una rampa de cuatro puntos en donde la etapa de aceleración es igual a la etapa de desaceleración.

Dicha rampa está definida por la siguiente ecuación 4.1.

$$\vec{x} = \vec{x}_0 + \vec{v}(t - t_0) + \frac{1}{2}\vec{a}(t - t_0)^2 \quad (4.1)$$

Por lo tanto, con los valores de aceleración, desaceleración, velocidad y desplazamiento se puede calcular el tiempo teórico necesario para la ejecución de un movimiento. A continuación en la siguiente tabla 4.1 se observan los valores de los parámetros ensayados.

Para realizar el ensayo se programó una aplicación de prueba que realizaba el siguiente procedimiento:

1. Configuración de movimiento descendente con valores de velocidad, aceleración y desplazamiento.
2. Ejecución del movimiento y registro del tiempo del sistema.

Para realizar el ensayo se conectó provisoriamente un analizador lógico USB a la placa electrónica, específicamente sobre los terminales que establecen la comunicación SPI entre el microcontrolador y el CI TMC5130. Se puede observar en la siguiente figura 4.2 el banco de prueba.

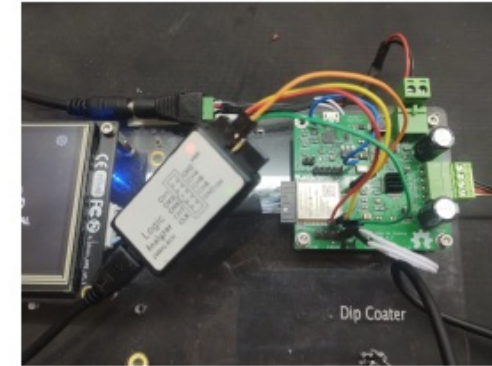


FIGURA 4.2. Ensayo sobre terminales SPI.

El procedimiento realizado fue el siguiente:

1. Se conectó el equipo dip coater con el software Putty para establecer una consola de comandos.
2. Se ejecutó el software del analizador lógico y se comenzó el registro de datos.
3. Se ejecutó el comando de lectura del registro [0x2D].
4. Se ejecutó el comando de escritura del registro [0x2D] con valor [0x00 0xFF 0x00 0x00].
5. Se realizó nuevamente una lectura del registro [0x2D] y para verificar el valor ingresado en el ítem anterior.

En la figura 4.3 se observa la ejecución del comando de lectura sobre el registro [0x2D].

- MOSI: [0x2D][0x00 0x00 0x00 0x00].
- MISO: [0x29][0x00 0x01 0xF8 0x88].

En la figura 4.4 se observa la ejecución del comando de escritura sobre el registro [0x2D] con valor [0x00 0xFF 0xFF 0x00].

- MOSI: [0x2D + 0x80 = 0xAD][0x00 0xFF 0x00 0x00].
- MISO: [0x11][0x00 0x01 0xF8 0x88].

En la figura 4.5 se observa la ejecución nuevamente del comando de lectura sobre el registro [0x2D].

- MOSI: [0x2D][0x00 0xFF 0x00 0x00].

TABLA 4.1. Ensayo de tiempos en desplazamiento

Velocidad (mm/min)	Aceleración-Desaceleración(m/min ²)	Desplazamiento(mm)
1 mm/min	100-500-1000-2100 m/min ²	50 mm
10 mm/min	100-500-1000-2100 m/min ²	50 mm
100 mm/min	100-500-1000-2100 m/min ²	50 mm
200 mm/min	100-500-1000-2100 m/min ²	50 mm
500 mm/min	100-500-1000-2100 m/min ²	50 mm
800 mm/min	100-500-1000-2100 m/min ²	50 mm

3. Registro del tiempo del sistema al final del movimiento, cálculo de variación temporal y envío del dato por terminal UART.
4. Configuración y ejecución de movimiento ascendente con sus respectivos registros y envío de dato.
5. Incremento de la tabla hacia nuevos parámetros.
6. Repetición del ciclo.
7. Un ordenador conectado al equipo ejecuta un script de Python que almacena los datos recibidos en un archivo.

En la siguiente figura 4.2 se observa en el eje Y el tiempo en ms necesario para ejecutar cada movimiento, los dos puntos cercanos representan el descenso y ascenso con los mismos parámetros de velocidad, aceleración y desplazamiento. El gráfico compara los tiempos teórico respecto a los tiempos registrados. A simple vista no se puede visualizar diferencias significativas entre ambos pares de puntos.

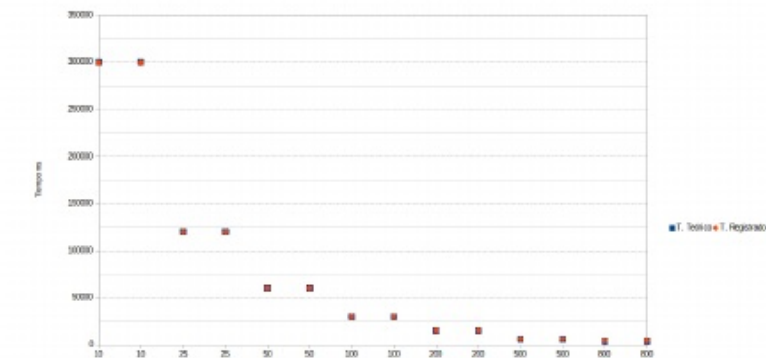


FIGURA 4.2. Comparación de tiempos teóricos y registrados.

Se presenta a continuación en la figura 4.3 un gráfico que representa los errores relativos porcentuales de las mediciones anteriores. Se puede deducir que existe un aumento del error relativo a velocidades altas, con un registro pico en la

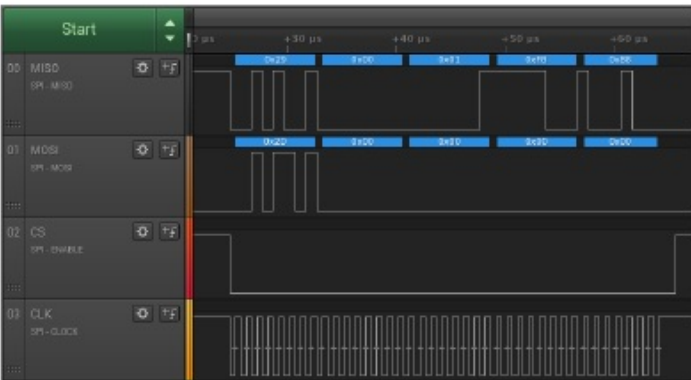


FIGURA 4.3. Comando de lectura sobre registro [0x2D].



FIGURA 4.4. Comando de escritura sobre registro [0x2D].

- MISO: [0x11][0x00 0xFF 0x00 0x00].



FIGURA 4.5. Comando de lectura actualizado sobre registro [0x2D].

Se observa entonces que luego de estas operaciones el registro [0x2D] se actualizó correctamente con el valor[0x00 0xFF 0x00 0x00].

Con este ensayo se validó la correcta comunicación entre el microcontrolador y el CI TMC5130 para las operaciones de lectura y escritura de datos.

velocidad de 800 mm/min.

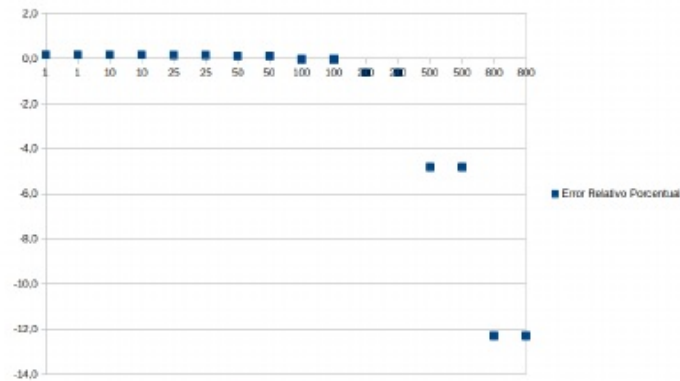


FIGURA 4.3. Error relativo porcentual.

Se concluye con este ensayo que el equipo es muy preciso en la mayor parte del rango para el cual fue diseñado teniendo un error relativo pico de 13 % en las velocidades superiores del rango de funcionamiento.

4.3. Calibración del equipo

4.3.1. Desplazamiento lineal y micro pasos

Este ensayo se realizó para definir y ajustar la constante de desplazamiento que relaciona los micros pasos realizados por el motor con la distancia de desplazamiento del carro. La misma es una constante que está definida por las dimensiones del tornillo, es decir el paso del mismo, sobre el cual se desplaza el carro.

Para realizar las mediciones se utilizó un comparador digital de la marca Asimeto[29] el cual puede observarse en la figura 4.4, el mismo tiene una resolución de 0.0001 mm y permite desplazamientos de 0 a 50 mm.



FIGURA 4.4. Comparador digital Asimeto.

4.2. Pruebas funcionales firmware

4.2.1. Tiempo de ejecución de movimientos

El ensayo se realizó para verificar los parámetros que definen el desplazamiento de la muestra, es decir para verificar que las velocidades y aceleraciones que definen movimientos sean similares a las que surgen del cálculo teórico.

En el capítulo 3 se detalló la configuración de la rampa de seis puntos que define un movimiento y se mostró la configuración de los parámetros para obtener una rampa de cuatro puntos en donde la etapa de aceleración es igual a la etapa de desaceleración.

Dicha rampa está definida por la siguiente ecuación 4.1.

$$\vec{x} = \vec{x}_0 + \vec{v}(t - t_0) + \frac{1}{2}\vec{a}(t - t_0)^2 \quad (4.1)$$

Por lo tanto, con los valores de aceleración, desaceleración, velocidad y desplazamiento se puede calcular el tiempo teórico necesario para la ejecución de un movimiento. A continuación en la siguiente tabla 4.1 se observan los valores de los parámetros ensayados.

TABLA 4.1. Ensayo de tiempos en desplazamiento

Velocidad (mm/min)	Aceleración-Desaceleración(m/min ²)	Desplazamiento(mm)
1 mm/min	100-500-1000-2100 m/min ²	50 mm
10 mm/min	100-500-1000-2100 m/min ²	50 mm
100 mm/min	100-500-1000-2100 m/min ²	50 mm
200 mm/min	100-500-1000-2100 m/min ²	50 mm
500 mm/min	100-500-1000-2100 m/min ²	50 mm
800 mm/min	100-500-1000-2100 m/min ²	50 mm

Para realizar el ensayo se programó una aplicación de prueba que realizaba el siguiente procedimiento:

1. Configuración de movimiento descendente con valores de velocidad, aceleración y desplazamiento.
2. Ejecución del movimiento y registro del tiempo del sistema.
3. Registro del tiempo del sistema al final del movimiento, cálculo de variación temporal y envío del dato por terminal UART.
4. Configuración y ejecución de movimiento ascendente con sus respectivos registros y envío de dato.
5. Incremento de la tabla hacia nuevos parámetros.
6. Repetición del ciclo.
7. Un ordenador conectado al equipo ejecuta un script de Python que almacena los datos recibidos en un archivo.

En la siguiente figura 4.6 se observa en el eje Y el tiempo en ms necesario para ejecutar cada movimiento, los dos puntos cercanos representan el descenso y

El ensayo consistió en medir seis desplazamientos sucesivos de 1 mm sobre el carro de manera descendente y luego de manera ascendente. Este ensayo es importante porque permite corregir la unidad de conversión de micro pasos a milímetros que utiliza el CI TMC5130 para realizar todos los movimientos. En la subsección 3.2.2 se mencionó la macro MACHINE STEPS PER MILLIMETER definida en el archivo hardware.h que surgió de este ensayo.

En la figura 4.7 se observa el banco de medición donde se visualiza el comparador Asimeto apoyado sobre una base metálica independiente con la punta del mismo en contacto directo con el carro de desplazamiento.



FIGURA 4.5. Ensayo de desplazamiento lineal.

Para iniciar el ensayo se presiona el botón *origin* del comparador para poner en cero la medida, la sensibilidad del mismo es tan grande que es difícil lograr 0,000 mm debido a la acción misma de apretar el botón. Luego se realizan movimientos descendentes de 1 mm y se registran los datos. En la siguiente tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos.

De igual manera se confecciona la siguiente tabla 4.3 para los movimientos ascendentes.

Para corregir el valor de micro pasos por milímetros de desplazamiento se utilizó el siguiente procedimiento.

- 1. Realizar un promedio de los 6 errores relativos ascendentes y descendentes.
- 2. Ajustar el valor inicial de micro pasos con los respectivos errores.

ascenso con los mismos parámetros de velocidad, aceleración y desplazamiento. El gráfico compara los tiempos teórico respecto a los tiempos registrados. A simple vista no se puede visualizar diferencias significativas entre ambos pares de puntos.

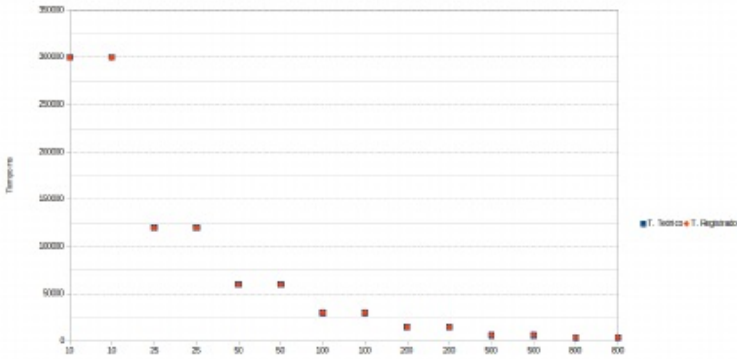


FIGURA 4.6. Comparación de tiempos teóricos y registrados.

Se presenta a continuación en la figura 4.7 un gráfico que representa los errores relativos porcentuales de las mediciones anteriores. Se puede deducir que existe un aumento del error relativo a velocidades altas, con un registro pico en la velocidad de 800 mm/min.

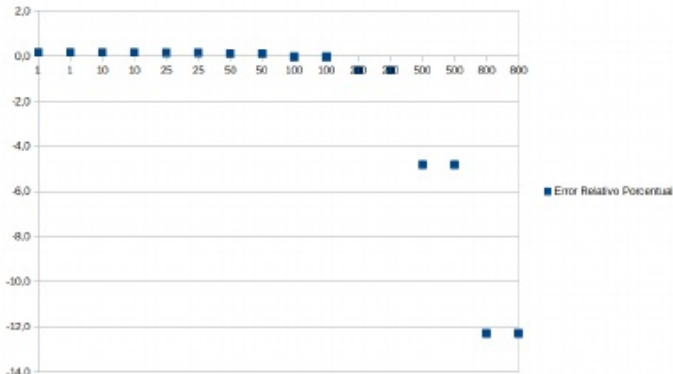


FIGURA 4.7. Error relativo porcentual.

Se concluye con este ensayo que el equipo es muy preciso en la mayor parte del rango para el cual fue diseñado teniendo un error relativo pico de 13% en las velocidades superiores del rango de funcionamiento.

TABLA 4.2. Ensayo de desplazamiento lineal descendentes

Posición absoluta	Desplazamiento relativo	Error Relativo
0,058 mm		
1,051 mm	0,993 mm	0,007
2,035 mm	0,984 mm	0,016
3,034 mm	0,999 mm	0,001
4,054 mm	1,02 mm	-0,020
5,039 mm	0,985 mm	0,015
5,998 mm	0,959 mm	0,041

TABLA 4.3. Ensayo de desplazamiento lineal ascendentes

Posición absoluta	Desplazamiento relativo	Error Relativo
0,02 mm		
0,939 mm	0,019 mm	0,081
1,931 mm	0,992 mm	0,008
2,929 mm	0,998 mm	0,002
3,923 mm	0,994 mm	0,006
4,923 mm	1 mm	0
5,911 mm	0,988 mm	0,012

3. Realizar un promedio entre el valor corregido ascendente y el valor corregido descendente.

Inicialmente al comenzar el ensayo la macro *MACHINE STEPS PER MILLIMETER* estaba definida con un valor de 12737 micro pasos por milímetros, luego de sucesivas correcciones la macro quedó definida en 12932 micro pasos por milímetros. Este ensayo se repitió cinco veces hasta llegar a los valores presentados en las tablas anteriores, en donde se observó que el porcentaje promedio de los errores relativos no afectaba en las décimas de milímetros.

4.4. Caso de prueba

4.5. Prueba de campo con personal capacitado

El siguiente ensayo consistió en una prueba completa del equipo dip coater con personal capacitado del Instituto de Nanosistemas. La prueba que se llevó a cabo consistió en realizar el primer *thin films* del equipo, se utilizó un wafer de silicio como sustrato y una solución de dióxido de titanio disuelto en etanol para formar un film de nanopartículas de titanio.

4.3. Calibración del equipo

4.3.1. Desplazamiento lineal y micro pasos

Este ensayo se realizó para definir y ajustar la constante de desplazamiento que relaciona los micro pasos realizados por el motor con la distancia de desplazamiento del carro. La misma es una constante que está definida por las dimensiones del tornillo, es decir el paso del mismo, sobre el cual se desplaza el carro.

Para realizar las mediciones se utilizó un comparador digital de la marca Asimeto[29] el cual puede observarse en la figura 4.8, el mismo tiene una resolución de 0.0001 mm y permite desplazamientos de 0 a 50 mm.



FIGURA 4.8. Comparador digital Asimeto.

El ensayo consistió en medir seis desplazamientos sucesivos de 1 mm sobre el carro de manera descendente y luego de manera ascendente. Este ensayo es importante porque permite corregir la unidad de conversión de micro pasos a milímetros que utiliza el CI TMC5130 para realizar todos los movimientos. En la subsección 3.2.2 se mencionó la macro *MACHINE STEPS PER MILLIMETER* definida en el archivo *hardware.h* que surgió de este ensayo.

En la figura 4.11 se observa el banco de medición donde se visualiza el comparador Asimeto apoyado sobre una base metálica independiente con la punta del mismo en contacto directo con el carro de desplazamiento.

Para iniciar el ensayo se presiona el botón *origin* del comparador para poner en cero la medida, la sensibilidad del mismo es tan grande que es difícil lograr 0,000 mm debido a la acción misma de apretar el botón. Luego se realizan movimientos descendentes de 1 mm y se registran los datos. En la siguiente tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos.

De igual manera se confecciona la siguiente tabla 4.3 para los movimientos ascendentes.

Para corregir el valor de micro pasos por milímetros de desplazamiento se utilizó el siguiente procedimiento.

1. Realizar un promedio de los 6 errores relativos ascendentes y descendentes.
2. Ajustar el valor inicial de micro pasos con los respectivos errores.
3. Realizar un promedio entre el valor corregido ascendente y el valor corregido descendente.

4.5. Prueba de campo con personal capacitado

41



FIGURA 4.6. Ensayo completo en laboratorio.

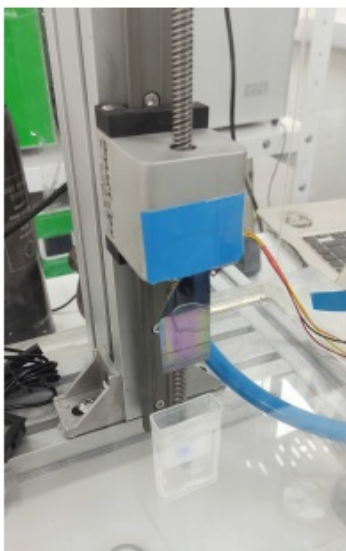


FIGURA 4.7. Ensayo con wafer de silicio.

4.4. Caso de prueba

41



FIGURA 4.9. Ensayo de desplazamiento lineal.

Inicialmente al comenzar el ensayo la macro *MACHINE STEPS PER MILLIMETER* estaba definida con un valor de 12737 micro pasos por milímetros, luego de sucesivas correcciones la macro quedo definida en 12932 micro pasos por milímetros. Este ensayo se repitió cinco veces hasta llegar a los valores presentados en las tablas anteriores, en donde se observó que el porcentaje promedio de los errores relativos no afectaba en las décimas de milímetros.

4.4. Caso de prueba

4.5. Prueba de campo con personal capacitado

El siguiente ensayo consistió en una prueba completa del equipo dip coater con personal capacitado del Instituto de Nanosistemas. La prueba que se llevo a cabo consistió en realizar el primer *thin films* del equipo, se utilizó un wafer de silicio como sustrato y una solución de dióxido de titanio disuelto en etanol para formar un film de nanopartículas de titanio.

TABLA 4.2. Ensayo de desplazamiento lineal descendentes

Posición absoluta	Desplazamiento relativo	Error Relativo
0,058 mm		
1,051 mm	0,993 mm	0,007
2,035 mm	0,984 mm	0,016
3,034 mm	0,999 mm	0,001
4,054 mm	1,02 mm	-0,020
5,039 mm	0,985 mm	0,015
5,998 mm	0,959 mm	0,041

TABLA 4.3. Ensayo de desplazamiento lineal ascendentes

Posición absoluta	Desplazamiento relativo	Error Relativo
0,02 mm		
0,939 mm	0,019 mm	0,081
1,931 mm	0,992 mm	0,008
2,929 mm	0,998 mm	0,002
3,923 mm	0,994 mm	0,006
4,923 mm	1 mm	0
5,911 mm	0,988 mm	0,012



FIGURA 4.10. Ensayo completo en laboratorio.

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones principales sobre la fabricación de un equipo dip coater, se detallan los logros más importantes del trabajo y se mencionan algunos puntos para mejorar en futuros trabajos. Por último se plantean los planes inmediatos de desarrollo, fabricación y comercialización del equipo.

5.1. Resultados obtenidos

El principal hito del trabajo fue fabricar un MVP (Producto Mínimo Viable) de equipo dip coater que cuente con las características suficientes para satisfacer las demandas de primeros usuarios. Se señalan a continuación los siguientes logros en el desarrollo del presente trabajo:

- Diseñar y fabricar un lote de cinco unidades con la primer versión de placa electrónica.
- Desarrollar un firmware modular que cumple con todos los requerimientos y permite incorporar nuevas funcionalidades sin cambios importantes en la estructura.
- Generar la capacidad técnica suficiente para fabricar las piezas mecanizadas del primer equipo.

Lamentablemente la planificación original no pudo ser sostenida. Abarcar integralmente la fabricación de un MVP implicó demasiado trabajo para los tiempos y recursos establecidos. Existieron retrasos en el diseño y la fabricación mecánica lo que llevó a no poder estimar con exactitud los tiempos. Sin embargo, surge de este trabajo una base de conocimiento importante que permite comenzar con el desarrollo y la fabricación de otro MVP en tiempos más acotados y con una planificación más certera.

5.2. Próximos pasos

Se plantean los siguientes puntos fundamentales para el futuro inmediato del equipo:

- Se fabricará un lote nuevo de diez placas.
- Se incorporará un módulo de software para el registro de parámetros de humedad y temperatura, que será integrado con el desarrollo futuro de una cámara de humedad compatible con este equipo.

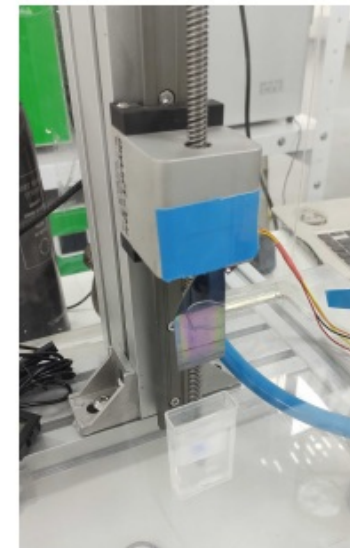


FIGURA 4.11. Ensayo con wafer de silicio.

- Durante el mes de agosto del presente año, investigadores del INS (Instituto de Nanosistemas) llevarán a cabo ensayos para caracterizar el equipo. El ensayo contemplará la generación de cincuenta *thin films* sobre soluciones químicas de TiO_2 y SiO_2 caracterizadas a través del método XRR (reflectometría de rayos-X). Surgirá de este ensayo un documento técnico con los resultados obtenidos.
- A través de un arreglo de cooperación se entregarán dos equipos a usuarios calificados para realizar pruebas funcionales y evaluar su satisfacción. Se realizarán cambios de ser necesario.
- Se trabajará en conjunto con un diseñador industrial para convertir este MVP en un producto comercial de la empresa TECSCI.

Bibliografía

- [1] OSH. *Open Source Hardware Association*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.oshwa.org/definition/spanish/>.
- [2] Martin Abel Gambarotta. *Firmware*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://gitlab.com/tecsci/dipcoater>.
- [3] Martin Abel Gambarotta. *Hardware*. Visitado el 15-03-2022. URL: https://github.com/martinch14/tecsci_dipcoater_hardware_kicad.
- [4] Nadetech. *Dip coating process*. Visitado el 23-03-2022. URL: <https://nadetech.wordpress.com/2017/05/18/dip-coating/>.
- [5] Kibron. *Dip coater*. Visitado el 04-01-2022. URL: <https://www.kibron.com/layerx-134>.
- [6] Biolin Scientific. *Dip coater*. Visitado el 04-01-2022. URL: <https://www.biolinscientific.com/ksvlima/fabrication-and-deposition-of-thin-films/dip-coaters>.
- [7] Bungard. *Dip coater machine*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.bungard.de/en/machines/dip-coaters/rdc-15>.
- [8] Ossila. *Dip coater machine*. Visitado el 08-03-2022. URL: <https://www.ossila.com/products/dip-coater>.
- [9] Holmarc. *Dip coater machine*. Visitado el 10-03-2022. URL: https://www.holmarc.com/dip_coating_unit.php.
- [10] Trinamic. *Motion Control*. URL: <https://www.trinamic.com/>.
- [11] Kicad. *Open Source Electronics Design*. URL: <https://www.kicad.org/>.
- [12] Marco Faustini y col. «Preparation of Sol-Gel Films by Dip-Coating in Extreme Conditions». En: *J. Phys. Chem. C* 114.17 (2010), págs. 7637-7645. DOI: 10.1021/jp9114755. URL: <https://doi.org/10.1021/jp9114755>.
- [13] Nanotec. *Nema17*. Visitado el 29-03-2022. URL: <https://en.nanotec.com/products/250-st4118-stepper-motor-nema-17>.
- [14] Analog Devices. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.analog.com/en/index.html>.
- [15] Trinamic Motion Control. *TMC5130*. URL: <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc5130a-ta/>.
- [16] TMC5130. *Schematic*. URL: <https://www.trinamic.com/support/eval-kits/details/tmc5130-eval/>.
- [17] Stoneitech. *HMI Stone Display*. URL: <https://www.stoneitech.com/>.
- [18] Perfiles de aluminio. *Net*. Visitado el 22-03-2022. URL: <https://perfilesdealuminio.net/>.
- [19] Igus. *Plastics for longer life*. URL: <https://www.igus.com.ar/>.
- [20] Bobcad. *Bobcad CAD/CAM*. URL: <https://bobcad.com/>.
- [21] Fagor. *Fagor Automation*. URL: <https://www.fagorautomation.com/>.
- [22] Norma RS-274. *G-Code*. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=823374.
- [23] ESP. *Espressif*. Visitado el 23-03-2022. URL: <https://www.espressif.com/>.

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones principales sobre la fabricación de un equipo dip coater, se detallan los logros más importantes del trabajo y se mencionan algunos puntos para mejorar en futuros trabajos. Por último se plantean los planes inmediatos de desarrollo, fabricación y comercialización del equipo.

5.1. Resultados obtenidos

El principal hito del trabajo fue fabricar un MVP (Producto Mínimo Viable) de equipo dip coater que cuente con las características suficientes para satisfacer las demandas de primeros usuarios. Se señalan a continuación los siguientes logros en el desarrollo del presente trabajo:

- Diseñar y fabricar un lote de cinco unidades con la primer versión de placa electrónica.
- Desarrollar un firmware modular que cumple con todos los requerimientos y permite incorporar nuevas funcionalidades sin cambios importantes en la estructura.
- Generar la capacidad técnica suficiente para fabricar las piezas mecanizadas del primer equipo.

Lamentablemente la planificación original no pudo ser sostenida. Abarcar integralmente la fabricación de un MVP implicó demasiado trabajo para los tiempos y recursos establecidos. Existieron retrasos en el diseño y la fabricación mecánica lo que llevó a no poder estimar con exactitud los tiempos. Sin embargo, surge de este trabajo una base de conocimiento importante que permite comenzar con el desarrollo y la fabricación de otro MVP en tiempos más acotados y con una planificación más certera.

5.2. Próximos pasos

Se plantean los siguientes puntos fundamentales para el futuro inmediato del equipo:

- Se fabricará un lote nuevo de diez placas.
- Se incorporará un módulo de software para el registro de parámetros de humedad y temperatura, que será integrado con el desarrollo futuro de una cámara de humedad compatible con este equipo.

- [24] NodeMCU. *Open Source Hardware*. Visitado el 24-03-2022. URL: <https://github.com/nodemcu/nodemcu-devkit-v1.0>.
- [25] CERN. *Open Hardware Licence*. URL: <https://ohwr.org/cernohl>.
- [26] Ernesto Mayer S.A. *Fabricante de circuitos impresos*. URL: <https://www.mayerpcb.com/>.
- [27] Asembli. *Montaje de Componentes*. URL: <https://www.asembli.com/>.
- [28] ESP-IDF. *Framework Espressif*. Visitado el 13-05-2022. URL: <https://github.com/espressif/esp-idf>.
- [29] Asimeto. Visitado el 10-07-2022. URL: <https://www.asimeto.com/product-IP65-Digital-Indicators-Series-407.html>.

- Durante el mes de agosto del presente año, investigadores del INS (Instituto de Nanosistemas) llevarán a cabo ensayos para caracterizar el equipo. El ensayo contemplará la generación de cincuenta *thin films* sobre soluciones químicas de TiO_2 y SiO_2 caracterizadas a través del método XRR (reflectometría de rayos-X). Surgirá de este ensayo un documento técnico con los resultados obtenidos.
- A través de un arreglo de cooperación se entregarán dos equipos a usuarios calificados para realizar pruebas funcionales y evaluar su satisfacción. Se realizarán cambios de ser necesario.
- Se trabajará en conjunto con un diseñador industrial para convertir este MVP en un producto comercial de la empresa TECSCI.