

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
2.6. Herramientas de desarrollo	15
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	18
3.1.4. Driver TMC5130	19
3.1.5. Diseño final	20
3.1.6. Fabricación	21
3.2. Firmware	22
3.2.1. Capas de abstracción	22
3.2.2. Módulos principales de software	23
Funcionamiento general	23
Control de movimientos	23
Consola de comandos	27
Pantalla táctil	29
Registros de variables ambientales	31
Parámetros de calibración	32
3.3. Estructura mecánica	34
3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecaniza- do CNC	34
Etapa CAD	34
Etapa CAM	35
3.3.2. Modelos 3D y real	36

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	13
2.6. Herramientas de desarrollo	15
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	18
3.1.4. Driver TMC5130	19
3.1.5. Diseño final	20
3.1.6. Fabricación	21
3.2. Firmware	22
3.2.1. Capas de abstracción	22
3.2.2. Módulos principales de software	23
Funcionamiento general	23
Control de movimientos	23
Consola de comandos	27
Pantalla táctil	29
Registros de variables ambientales	31
Parámetros de calibración	32
3.3. Estructura mecánica	34
3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecaniza- do CNC	34
Etapa CAD	34
Etapa CAM	35
3.3.2. Modelos 3D y real	36

IV

4. Ensayos y resultados	39
4.1. Pruebas funcionales de hardware	39
4.1.1. Comunicación con driver TMC5130	39
4.2. Pruebas funcionales del firmware	41
4.2.1. Tiempo de ejecución de movimientos	41
4.2.2. Ejecución de comandos	42
4.3. Calibración del equipo	44
4.3.1. Desplazamiento lineal y micro pasos	44
4.4. Caso de prueba	47
4.5. Prueba de campo con personal capacitado	47
5. Conclusiones	49
5.1. Resultados obtenidos	49
5.2. Próximos pasos	49
Bibliografía	51

IV

4. Ensayos y resultados	39
4.1. Pruebas funcionales de hardware	39
4.1.1. Comunicación con driver TMC5130	39
4.2. Pruebas funcionales del firmware	41
4.2.1. Tiempo de ejecución de movimientos	41
4.2.2. Ejecución de comandos	42
4.3. Calibración del equipo	44
4.3.1. Desplazamiento lineal y micro pasos	44
4.4. Caso de prueba	47
4.5. Prueba de campo con personal capacitado	47
4.6. Comparación con el estado del arte	49
5. Conclusiones	51
5.1. Resultados obtenidos	51
5.2. Próximos pasos	51
Bibliografía	53

VI

4.1. Banco de pruebas.	39
4.2. Ensayo sobre terminales SPI.	40
4.3. Comando de lectura sobre registro [0x2D].	40
4.4. Comando de escritura sobre registro [0x2D].	41
4.5. Comando de lectura actualizado sobre registro [0x2D].	41
4.6. Comparación de tiempos teóricos y registrados.	43
4.7. Error relativo porcentual.	43
4.8. Comando DOWN descartado por equipo en funcionamiento.	44
4.9. Comando STOP procesado.	44
4.10. Comparador digital Asimeto.	45
4.11. Ensayo de desplazamiento lineal.	45
4.12. Ensayo completo en laboratorio.	47
4.13. Ensayo con wafer de silicio.	48
5.1. Render de equipo comercial.	50

VI

4.1. Banco de pruebas.	39
4.2. Ensayo sobre terminales SPI.	40
4.3. Comando de lectura sobre registro [0x2D].	40
4.4. Comando de escritura sobre registro [0x2D].	41
4.5. Comando de lectura actualizado sobre registro [0x2D].	41
4.6. Comparación de tiempos teóricos y registrados.	43
4.7. Error relativo porcentual.	43
4.8. Comando DOWN descartado por equipo en funcionamiento.	44
4.9. Comando STOP procesado.	44
4.10. Comparador digital Asimeto.	45
4.11. Ensayo de desplazamiento lineal.	45
4.12. Ensayo completo en laboratorio.	47
4.13. Wafer de silicio sobre carro.	48
4.14. Ensayo final.	48
5.1. Render de equipo comercial.	52

Índice de tablas

1.1. Dip coaters en el mercado	5
2.1. Comparación Stone	12
4.1. Ensayo de tiempo en desplazamientos	42
4.2. Ensayo de desplazamiento	46
4.3. Ensayo de desplazamiento	46

Índice de tablas

1.1. Dip coaters en el mercado	5
2.1. Comparación Stone	12
4.1. Ensayo de tiempo en desplazamientos	42
4.2. Ensayo de desplazamiento	46
4.3. Ensayo de desplazamiento	46
4.4. Dip coaters en el mercado	49

Los resultados del experimento concluyen en que existe linealidad en la relación de espesor respecto a la velocidad de extracción entre $60 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ y $600 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$. También demuestra que en dicho rango de velocidades el fenómeno se explica por el modelo de evaporación.

Se desprende de este análisis la importancia de los siguientes requerimientos funcionales definidos por el cliente:

- El sistema debe contar con un rango de velocidades de desplazamiento de muestra entre $[1 - 1000 \frac{\text{mm}}{\text{min}}]$.
- El sistema debe contar con un rango de aceleraciones de desplazamiento de muestra entre $[1000 - 15000 \frac{\text{m}}{\text{min}^2}]$.

Cabe destacar que todos los experimentos en la publicación fueron realizados a velocidad constante. De las reuniones con el cliente y del interés de trabajar en la frontera de la ciencia surgió la necesidad de poder darle al usuario la posibilidad de realizar experimentos a velocidad y aceleración controlada. Esto último es una cualidad que diferencia a este equipo respecto de todos los equipos comerciales analizados en la sección 1.3.

2.2. Circuitos integrados Trinamic

De reuniones con el cliente en donde se remarca la importancia de trabajar con un control preciso de motor y en base a experiencias de uso de equipos con tecnologías similares surge el interés de trabajar con un fabricante de driver específico. Se definen entonces los siguientes requerimientos:

- El equipo deberá contar con un motor paso a paso Nema 17 [14] para realizar los movimientos.
- Se utilizará un driver de motor de la marca Trinamic Motion Control.

Trinamic [11] se especializa en la fabricación de CI (Circuitos Integrados) para el control de diferentes tipos de motores, su tecnología se basa en convertir **señales** digitales en movimientos controlados. Tiene una experiencia **de veinte años** en la industria del control de **motores, lo que garantiza en cierta medida la calidad de sus productos**. Actualmente fue adquirida por la compañía Analog Devices [15].

Cabe destacar que los integrados fabricados por la empresa Trinamic se utilizan en diversas aplicaciones en donde la precisión es importante, como por ejemplo: impresión 3D, automatización industrial, robótica y equipos de laboratorio médico entre otras. Cuenta con una amplia gama de productos que se diferencian principalmente según el tipo de motor que se quiera accionar. Luego de estudiar las diferentes alternativas ofrecidas se eligió trabajar con el driver TMC5130 [16].

Todos los CI requieren una configuración inicial de parámetros que depende del tipo de motor y de la carga asociada al mismo. Para encontrarla la empresa ofrece el software TMCL-IDE y diferentes placas de desarrollo para trabajar sobre los diferentes drivers. La placa de desarrollo que corresponde al integrado seleccionado es la *TMC5130-Eval Evaluation Board* [17].

Los resultados del experimento concluyen en que existe linealidad en la relación de espesor respecto a la velocidad de extracción entre $60 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ y $600 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$. También demuestra que en dicho rango de velocidades el fenómeno se explica por el modelo de evaporación.

Se desprende de este análisis la importancia de los siguientes requerimientos funcionales definidos por el cliente:

- El sistema debe contar con un rango de velocidades de desplazamiento de muestra entre $[1 - 1000 \frac{\text{mm}}{\text{min}}]$.
- El sistema debe contar con un rango de aceleraciones de desplazamiento de muestra entre $[1000 - 15000 \frac{\text{m}}{\text{min}^2}]$.

Cabe destacar que todos los experimentos en la publicación fueron realizados a velocidad constante. De las reuniones con el cliente y del interés de trabajar en la frontera de la ciencia surgió la necesidad de poder darle al usuario la posibilidad de realizar experimentos a velocidad y aceleración controlada. Esto último es una cualidad que diferencia a este equipo respecto de todos los equipos comerciales analizados en la sección 1.3.

2.2. Circuitos integrados Trinamic

De reuniones con el cliente en donde se remarca la importancia de trabajar con un control preciso de motor y en base a experiencias de uso de equipos con tecnologías similares surge el interés de trabajar con un fabricante de driver específico. Se definen entonces los siguientes requerimientos:

- El equipo deberá contar con un motor paso a paso Nema 17 [14] para realizar los movimientos.
- Se utilizará un driver de motor de la marca Trinamic Motion Control.

Trinamic [11] se especializa en la fabricación de CI (Circuitos Integrados) para el control de diferentes tipos de motores, su tecnología se basa en convertir **señales** digitales en movimientos controlados. Tiene una **amplia** experiencia en la industria del control de **motores y sus CI son utilizados en una gran variedad de productos**. Actualmente fue adquirida por la compañía Analog Devices [15].

Cabe destacar que los integrados fabricados por la empresa Trinamic se utilizan en diversas aplicaciones en donde la precisión es importante, como por ejemplo: impresión 3D, automatización industrial, robótica y equipos de laboratorio médico entre otras. Cuenta con una amplia gama de productos que se diferencian principalmente según el tipo de motor que se quiera accionar. Luego de estudiar las diferentes alternativas ofrecidas se eligió trabajar con el driver TMC5130 [16].

Todos los CI requieren una configuración inicial de parámetros que depende del tipo de motor y de la carga asociada al mismo. Para encontrarla la empresa ofrece el software TMCL-IDE y diferentes placas de desarrollo para trabajar sobre los diferentes drivers. La placa de desarrollo que corresponde al integrado seleccionado es la *TMC5130-Eval Evaluation Board* [17].

El TMCL-IDE se ejecuta sobre una placa de desarrollo general compatible con diferentes kits de evaluación. En la figura 2.2 se observa a izquierda la placa Startrampe que se conecta entre la computadora y la placa de evaluación TMC5130-Eval que se observa a derecha.

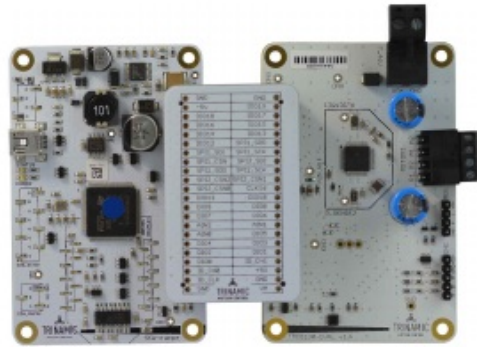


FIGURA 2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130².

2.2.1. Driver TMC5130

El driver TMC5130 permite operar motores bipolares de dos fases comúnmente conocidos como motores paso a paso. El CI incorpora una etapa de potencia con tecnología MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) que permite manejar corrientes de hasta dos amperios por fase. En el caso del dip coater el peso de la carga es despreciable.

Se observa en la figura 2.3 el diagrama en bloque del CI.

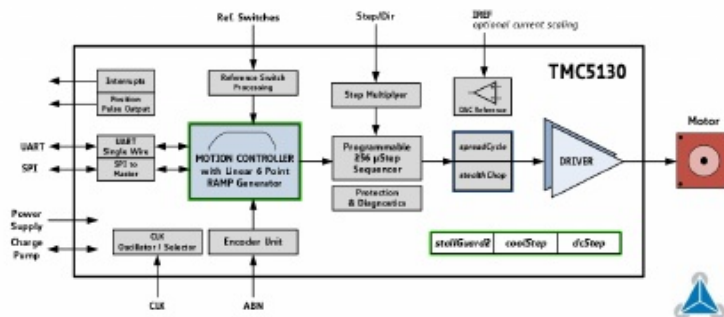


FIGURA 2.3. Diagrama en bloques TMC5130³.

²Imagen tomada de [11].

El TMCL-IDE se ejecuta sobre una placa de desarrollo general compatible con diferentes kits de evaluación. En la figura 2.2 se observa a izquierda la placa Startrampe que se conecta entre la computadora y la placa de evaluación TMC5130-Eval que se observa a derecha.

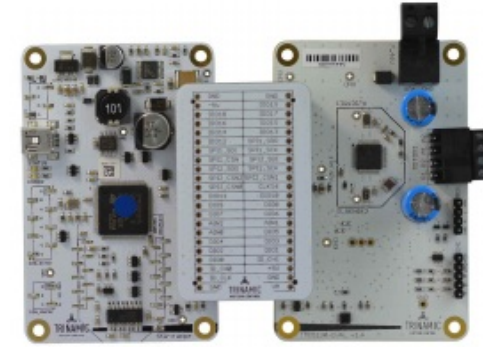


FIGURA 2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130².

2.2.1. Driver TMC5130

El driver TMC5130 permite operar motores bipolares de dos fases comúnmente conocidos como motores paso a paso. El CI incorpora una etapa de potencia con tecnología MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) que permite manejar corrientes de hasta dos amperios por fase. Se observa en la figura 2.3 el diagrama en bloque del CI.

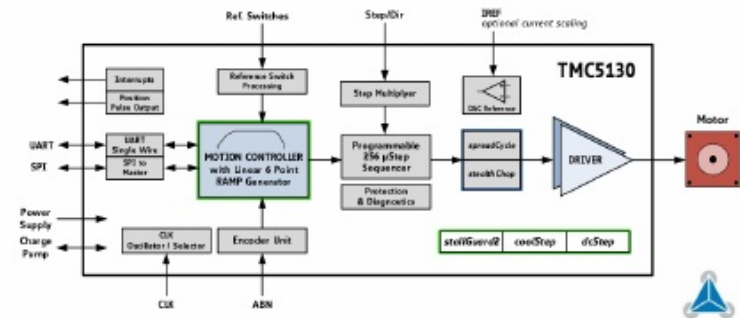


FIGURA 2.3. Diagrama en bloques TMC5130³.

La comunicación con el CI se puede establecer a través del protocolo serie o SPI (Serial Peripheral Interface), para el desarrollo de este trabajo se utilizó el protocolo de comunicación SPI.

²Imagen tomada de [11].

La comunicación con el CI se puede establecer a través del protocolo serie o SPI (Serial Peripheral Interface), para el desarrollo de este trabajo se utilizó el protocolo de comunicación SPI.

Los pasos que definen a este tipo de motores están relacionados con las fases y con la cantidad de dientes que tienen en su rotor y estator. Un paso es el movimiento mínimo que el motor puede hacer. Un motor paso a paso, como su nombre lo indica, realiza movimientos a través de pasos sucesivos. Por ejemplo, es común contar con algún motor en donde la especificación indica que el paso es de 1.8° , esto significa que por cada vuelta de motor 360° , el mismo realizará 200 pasos.

Una funcionalidad que incorpora este CI es incrementar la cantidad de pasos, el fabricante los denomina micropasos. El driver puede generar hasta un máximo de 256 micropasos por cada paso del motor. Siguiendo con el ejemplo recién presentado, para un motor de paso 1.8° se tendrán en total 51200 micropasos, como se observa en la ecuación 2.1.

$$(360/1.8) * 256 = 51200 \text{ micropasos por revolución} \quad (2.1)$$

Una característica importante a destacar es la posibilidad de programar la cantidad de pasos que da el motor.

Otra funcionalidad que se utilizará es *stallguard2*, una función que mide la fuerza contraelectromotriz generada en las bobinas del motor por cambios de carga en el eje. Como se observa en la figura 2.4 el valor del registro *stallguard2* se decrementa linealmente a medida que la carga aumenta.

Es decir, el motor gira con un valor asociado de fuerza contraelectromotriz dado por la carga acoplada al eje, si se aplica una fuerza contraria al movimiento programado o el recorrido del carro llega a un límite mecánico, la fuerza contraelectromotriz aumentará.

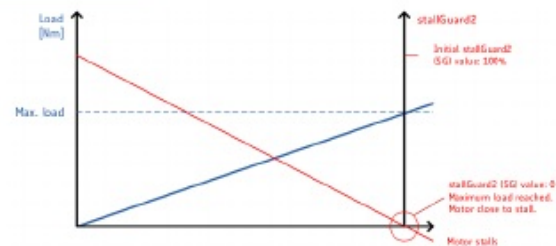


FIGURA 2.4. Función *stallguard2*.⁴

En el capítulo 3 se estudiará el valor del registro *stallguard2* configurado. Cada vez que el equipo se enciende se realizará un movimiento hacia un extremo del recorrido para buscar el cero de máquina. Se utilizará entonces esta medida para encontrar un límite mecánico del sistema y realizar un posicionamiento inicial. El

⁴Imagen tomada de [11].

Los pasos que definen a este tipo de motores están relacionados con las fases y con la cantidad de dientes que tienen en su rotor y estator. Un paso es el movimiento mínimo que el motor puede hacer. Un motor paso a paso, como su nombre lo indica, realiza movimientos a través de pasos sucesivos. Por ejemplo, es común contar con algún motor en donde la especificación indica que el paso es de 1.8° , esto significa que por cada vuelta de motor 360° , el mismo realizará 200 pasos.

Una funcionalidad que incorpora este CI es incrementar la cantidad de pasos, el fabricante los denomina micropasos. El driver puede generar hasta un máximo de 256 micropasos por cada paso del motor. Siguiendo con el ejemplo recién presentado, para un motor de paso 1.8° se tendrán en total 51200 micropasos, como se observa en la ecuación 2.1.

$$(360/1.8) * 256 = 51200 \text{ micropasos por revolución} \quad (2.1)$$

Una característica importante a destacar es la posibilidad de programar la cantidad de pasos que da el motor. El CI cuenta con el registro XACTUAL que tiene la cantidad de pasos absolutos desde una referencia inicial. También cuenta con el registro XTARGET que tiene una posición objetivo, cuando se escribe este registro el CI se accionará hasta lograr que XACTUAL = XTARGET.

Otra funcionalidad que se utilizó fue *stallguard2*, una función que mide la fuerza contraelectromotriz generada en las bobinas del motor por cambios de carga en el eje. En la figura 2.4 se observa que el valor del registro *stallguard2* se decrementa linealmente a medida que la carga aumenta. Cuando se aplica una fuerza contraria al movimiento programado o el recorrido del carro llega a un límite mecánico, la fuerza contraelectromotriz aumenta.

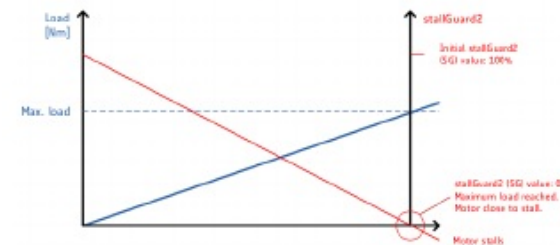


FIGURA 2.4. Función *stallguard2*.⁴

En el capítulo 3 se estudiará el valor del registro *stallguard2* configurado. Cada vez que el equipo se enciende se realiza un movimiento hacia un extremo del recorrido para buscar el cero de máquina. Se utiliza esta medida para encontrar un límite mecánico del sistema y realizar un posicionamiento inicial. El uso de esta funcionalidad evita la incorporación de finales de carrera electromecánicos.

También se utilizó *coolstep*, una función que a través de mediciones de carga en el eje del motor adapta automáticamente la corriente suministrada hacia las bobinas, aumentando la eficiencia energética como puede observarse en la figura 2.5.

⁴Imagen tomada de [11].

uso de esta funcionalidad evita la incorporación de finales de carrera electromecánicos.

También se utilizará *coolstep*, una función que a través de mediciones de carga en el eje del motor adapta automáticamente la corriente suministrada hacia las bobinas, aumentando la eficiencia energética como puede observarse en la figura 2.5. El efecto final es reducir la energía suministrada según hojas de datos [16] hasta un 75 %. Esto aplica incluso en equipos donde la carga es constante, como es el caso del dip coater, ya que la carga variable representada por un wafer de silicio o un portaobjeto es completamente despreciable.

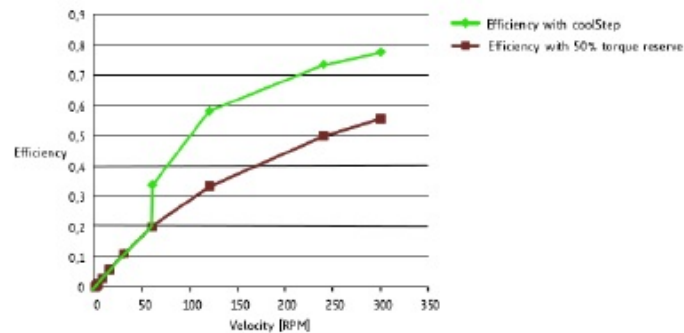


FIGURA 2.5. Función coolstep.⁵

Por último, se **utilizará** la función *dcStep*, que es un modo de conmutación **automático** que ajusta la velocidad del motor en caso de existir sobrecarga en el eje, es decir que si no puede mover la carga acoplada al eje con la velocidad establecida, se ajusta a una velocidad menor para poder seguir en movimiento y no detenerse por completo.

El driver TMC5130 cuenta con cincuenta registros que se utilizan para configurar las funcionalidades del CI y controlar el motor. En el capítulo 3 se darán más detalles de los registros configurados con la ayuda del software TMCL-IDE.

2.3. Interfaz de usuario

Respecto a la interacción entre el usuario y el equipo surgió en reuniones con el cliente la necesidad de contar con una interfaz moderna, que permita a un usuario dentro de un laboratorio configurar al equipo a pie de máquina. Dando lugar al siguiente requerimiento:

- La configuración de la máquina debe poder realizarse a través de una pantalla táctil.

Se decidió trabajar con pantallas del tipo HMI (*Human Machine Interface*). Las mismas se encargan exclusivamente del procesamiento gráfico. En general, cuentan con un software de diseño para la creación de la interfaz gráfica, es decir que

⁵Imagen tomada de [11].

El efecto final es reducir la energía suministrada según hojas de datos [16] hasta un 75 %. Esto aplica incluso en equipos donde la carga es constante, como es el caso del dip coater, ya que la carga variable representada por un wafer de silicio o un portaobjeto es completamente despreciable.

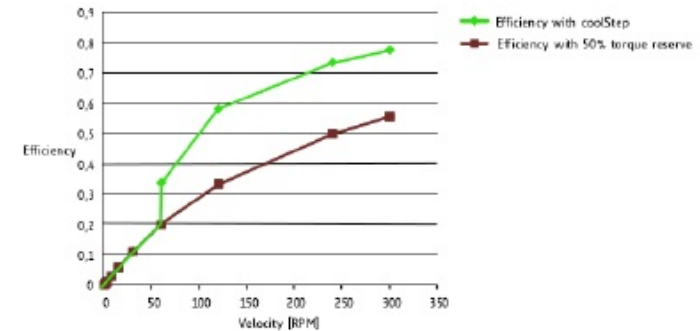


FIGURA 2.5. Función coolstep.⁵

Por último, se **utilizó** la función *dcStep*, que es un modo de conmutación **automático** que ajusta la velocidad del motor en caso de existir sobrecarga en el eje, es decir que si no puede mover la carga acoplada al eje con la velocidad establecida, se ajusta a una velocidad menor para poder seguir en movimiento y no detenerse por completo.

El driver TMC5130 cuenta con cincuenta registros que se utilizan para configurar las funcionalidades del CI y controlar el motor. En el capítulo 3 se darán más detalles de los registros configurados con la ayuda del software TMCL-IDE.

2.3. Interfaz de usuario

Respecto a la interacción entre el usuario y el equipo surgió en reuniones con el cliente la necesidad de contar con una interfaz moderna, que permita a un usuario dentro de un laboratorio configurar al equipo a pie de máquina. Dando lugar al siguiente requerimiento:

- La configuración de la máquina debe poder realizarse a través de una pantalla táctil.

Se decidió trabajar con pantallas del tipo HMI (*Human Machine Interface*). Las mismas se encargan exclusivamente del procesamiento gráfico. En general, cuentan con un software de diseño para la creación de la interfaz gráfica, es decir que permiten crear botones, barras, pantallas y diferentes tipos de objetos para interactuar con el usuario. Luego se le da funcionalidad a cada uno de estos objetos creados en el software y a través de un protocolo de comunicación se interactúa con el sistema de control, permitiendo finalmente controlar y configurar el equipo. En el caso de este equipo la pantalla se comunica con un microcontrolador,

⁵Imagen tomada de [11].

permiten crear botones, barras, pantallas y diferentes tipos de objetos para interaccionar con el usuario. Luego se le da funcionalidad a cada uno de estos objetos creados en el software y a través de un protocolo de comunicación se interactúa con el sistema de control, permitiendo finalmente controlar y configurar el equipo. En el caso de este equipo la pantalla se comunica con un microcontrolador, pero podría comunicarse con algún otro sistema de control como por ejemplo un PLC (*Programmable Logic Controller*).

Luego de una investigación de mercado se eligió a la empresa STONE [18]. El fabricante ofrece un catálogo amplio de pantallas que caracteriza según el tipo de aplicación y entorno de trabajo. Ofrece entonces pantallas para usos industriales, civiles o avanzados. Por las dimensiones finales del equipo y el tipo de uso se optó por pantallas avanzadas de 4.3 pulgadas. Se detallan en la tabla 2.1 las características técnicas de dos pantallas de 4.3 pulgadas del fabricante.

TABLA 2.1. Comparación pantallas táctiles Stone 4.3.

	STWI043WT	STVI043WT
CPU	Cortex A8	CortexM4
Refresh Rate	1G Hz	200 MHz
Image format	png, bmp, jpg, svg, gif	bmp, jpg
Resolution	480×272 pixel	480×272 pixel
Flash	256 MB	128 MB
Color	262 K	65 K
PCB	2.0 mm black, ROHS	1.6 mm green
Touch Type	Resistive	Resistive
Interface	RS232/RS422/RS485/TTL	RS232/RS485/TTL

El modelo elegido fue el STWI043WT, que pertenece a la nueva línea productos, tiene mayor capacidad de procesamiento, cuenta con un software nuevo de configuración con mayores funcionalidades respecto al utilizado por el otro modelo y la diferencia de precios no supera el 15 %.

La comunicación de la pantalla STWI043WT con el microcontrolador se estableció a través del protocolo serie.

2.4. Estructura mecánica

Se presentan a continuación los siguientes requerimientos asociados a las partes mecánicas del equipo:

- La estructura principal del equipo debe ser fabricada con perfil de aluminio anodizado natural.
- El recorrido mecánico de desplazamiento de muestra debe ser como mínimo de [3500 mm].
- Las piezas especiales del equipo deben ser mecanizadas en aluminio.

Se decidió trabajar con el proveedor Perfiles de Aluminio .NET [19], que cuenta con diferentes modelos y dimensiones de perfiles necesarios para la fabricación de la estructura.

pero podría comunicarse con algún otro sistema de control como por ejemplo un PLC (*Programmable Logic Controller*).

Luego de una investigación de mercado se eligió a la empresa STONE [18]. El fabricante ofrece un catálogo amplio de pantallas que caracteriza según el tipo de aplicación y entorno de trabajo. Ofrece entonces pantallas para usos industriales, civiles o avanzados. Por las dimensiones finales del equipo y el tipo de uso se optó por pantallas avanzadas de 4.3 pulgadas. Se detallan en la tabla 2.1 las características técnicas de dos pantallas de 4.3 pulgadas del fabricante.

TABLA 2.1. Comparación pantallas táctiles Stone 4.3.

	STWI043WT	STVI043WT
CPU	Cortex A8	CortexM4
Refresh Rate	1G Hz	200 MHz
Image format	png, bmp, jpg, svg, gif	bmp, jpg
Resolution	480×272 pixel	480×272 pixel
Flash	256 MB	128 MB
Color	262 K	65 K
PCB	2.0 mm black, ROHS	1.6 mm green
Touch Type	Resistive	Resistive
Interface	RS232/RS422/RS485/TTL	RS232/RS485/TTL

El modelo elegido fue el STWI043WT, que pertenece a la nueva línea productos, tiene mayor capacidad de procesamiento, cuenta con un software nuevo de configuración con mayores funcionalidades respecto al utilizado por el otro modelo y la diferencia de precios no supera el 15 %.

La comunicación de la pantalla STWI043WT con el microcontrolador se estableció a través del protocolo serie.

2.4. Estructura mecánica

Se presentan a continuación los siguientes requerimientos asociados a las partes mecánicas del equipo:

- La estructura principal del equipo debe ser fabricada con perfil de aluminio anodizado natural.
- El recorrido mecánico de desplazamiento de muestra debe ser como mínimo de [3500 mm].
- Las piezas especiales del equipo deben ser mecanizadas en aluminio.

Se decidió trabajar con el proveedor Perfiles de Aluminio .NET [19], que cuenta con diferentes modelos y dimensiones de perfiles necesarios para la fabricación de la estructura.

El equipo cuenta con una guía lineal acoplada al perfil principal. Para la elección de la misma se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El ambiente cambia según las soluciones químicas utilizadas. Es posible entonces que se trabaje con soluciones corrosivas que afecten la estructura.
- El uso de lubricantes en las guías podría afectar la calidad del experimento.

2.4. Estructura mecánica

13

El equipo cuenta con una guía lineal acoplada al perfil principal. Para la elección de la misma se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El ambiente cambia según las soluciones químicas utilizadas. Es posible entonces que se trabaje con soluciones corrosivas que afecten la estructura.
2. El uso de lubricantes en las guías podría afectar la calidad del experimento.
3. Se deben evitar vibraciones en la estructura para no dañar la calidad del film.

Se decidió entonces trabajar con la empresa IGUS [20], que se especializa en la fabricación de polímeros. La misma ofrece guías lineales que se deslizan en lugar de rodar, y por lo tanto no utilizan rodamientos metálicos. Los polímeros están combinados con materiales anticorrosivos y no requieren de la aplicación de lubricante, es decir, que conforman un entorno de trabajo limpio y libre de mantenimiento periódico. Se observa en la figura 2.6 cuatro tipos de guías en donde se puede apreciar el polímero auto-lubricado que se ubica entre el eje y el carro.

FIGURA 2.6. Guía Lineal IGUS.⁶

Para el diseño y fabricación de piezas mecanizadas en aluminio se trabajó con el software BOBCAD [21] CAD/CAM (Computer-Aided Design /Computer-Aided Manufacturing). Un software utilizado en la industria manufacturera, que se encuentra constituido por dos módulos fundamentales que permiten abarcar aspectos de diseño y modelado de pieza y luego de fabricación.

Con la parte CAD se diseña el modelo 3D de la pieza. Con el fin de corregir errores de diseño con mayor velocidad, se realiza una impresión 3D con filamento plástico para probar las dimensiones y la factibilidad técnica de la pieza. Una vez que el modelo en su versión plástica queda aprobado, se comienza con la configuración del módulo CAM, este módulo se encarga de convertir, a través de diferentes estrategias, al modelo 3D en lenguaje de máquina que el equipo puede interpretar. Se observa en la imagen 2.7 la fresadora CNC de la marca FAGOR [22] utilizada para la fabricación de las piezas del equipo dip coater. El control de la fresadora interpreta el código G-CODE también conocido como RS-274 [23] generado por el modulo CAM y lo convierte en movimientos de motores.

⁶Imagen tomada de [20].

⁷Imagen tomada en el centro tecnológico de FUNINTEC.

2.5. Sistema electrónico propuesto

13

3. Se deben evitar vibraciones en la estructura para no dañar la calidad del film.

Se decidió entonces trabajar con la empresa IGUS [20], que se especializa en la fabricación de polímeros. La misma ofrece guías lineales que se deslizan en lugar de rodar, y por lo tanto no utilizan rodamientos metálicos. Los polímeros están combinados con materiales anticorrosivos y no requieren de la aplicación de lubricante, es decir, que conforman un entorno de trabajo limpio y libre de mantenimiento periódico. Se observa en la figura 2.6 cuatro tipos de guías en donde se puede apreciar el polímero auto-lubricado que se ubica entre el eje y el carro.

FIGURA 2.6. Guía Lineal IGUS.⁶

Para el diseño y fabricación de piezas mecanizadas en aluminio se trabajó con el software BOBCAD [21] CAD/CAM (Computer-Aided Design /Computer-Aided Manufacturing). Un software utilizado en la industria manufacturera, que se encuentra constituido por dos módulos fundamentales que permiten abarcar aspectos de diseño y modelado de pieza y luego de fabricación.

Con la parte CAD se diseña el modelo 3D de la pieza. Con el fin de corregir errores de diseño con mayor velocidad, se realiza una impresión 3D con filamento plástico para probar las dimensiones y la factibilidad técnica de la pieza. Una vez que el modelo en su versión plástica queda aprobado, se comienza con la configuración del módulo CAM, este módulo se encarga de convertir, a través de diferentes estrategias, al modelo 3D en lenguaje de máquina que el equipo puede interpretar. Se observa en la imagen 2.7 la fresadora CNC de la marca FAGOR [22] utilizada para la fabricación de las piezas del equipo dip coater. El control de la fresadora interpreta el código G-CODE también conocido como RS-274 [23] generado por el modulo CAM y lo convierte en movimientos de motores.

2.5. Sistema electrónico propuesto

Se presentan a continuación los siguientes requerimientos:

- El sistema debe permitir que el usuario pueda configurar en un programa variables de desplazamiento y tiempos de espera.
- Un programa previamente configurado debe poder ejecutarse o guardarse en memoria interna.

⁶Imagen tomada de [20].

⁷Imagen tomada en el centro tecnológico de FUNINTEC.

FIGURA 2.7. Fresadora Fagor GVC 600.⁷

2.5. Sistema electrónico propuesto

Se presentan a continuación los siguientes requerimientos:

- El sistema debe permitir que el usuario pueda configurar en un programa variables de desplazamiento y tiempos de espera.
- Un programa previamente configurado debe poder ejecutarse o guardarse en memoria interna.
- El usuario debe poder guardar al menos 10 programas en la memoria no volátil del sistema.
- Se debe utilizar control de versionado de cambios durante el desarrollo del firmware.
- El desarrollo del firmware debe realizarse con capas de abstracción de software de tal manera que permita en un futuro cambiar de microcontrolador sin mayor esfuerzo.
- El desarrollo se realizará sobre un módulo microcontrolador ESP32.
- Se deben registrar variables de humedad, presión y temperatura [opcional].

De reuniones con el cliente y de la necesidad de trabajar con un equipo que permita a futuro contar con una comunicación Wi-Fi, surgió el requerimiento de trabajar con el módulo ESP32 [24]. El ESP32 es un módulo del tipo SoC (*System On Chip*), es decir que además del microcontrolador y sus periféricos internos, agrega periféricos externos para brindar conectividad inalámbrica y almacenamiento extra para datos y programa.

Teniendo en cuenta los requerimientos analizados en las secciones previas y los requerimientos analizados en esta sección se propuso, como se observa en la figura 2.8, el siguiente esquema de equipo dip coater.

FIGURA 2.7. Fresadora Fagor GVC 600.⁷

- El usuario debe poder guardar al menos 10 programas en la memoria no volátil del sistema.
- Se debe utilizar control de versionado de cambios durante el desarrollo del firmware.
- El desarrollo del firmware debe realizarse con capas de abstracción de software de tal manera que permita en un futuro cambiar de microcontrolador sin mayor esfuerzo.
- El desarrollo se realizará sobre un módulo microcontrolador ESP32.
- Se deben registrar variables de humedad, presión y temperatura [opcional].

De reuniones con el cliente y de la necesidad de trabajar con un equipo que permita a futuro contar con una comunicación Wi-Fi, surgió el requerimiento de trabajar con el módulo ESP32 [24]. El ESP32 es un módulo del tipo SoC (*System On Chip*), es decir que además del microcontrolador y sus periféricos internos, agrega periféricos externos para brindar conectividad inalámbrica y almacenamiento extra para datos y programa.

Teniendo en cuenta los requerimientos analizados en las secciones previas y los requerimientos analizados en esta sección se propuso, como se observa en la figura 2.8, el siguiente esquema de equipo dip coater.

El equipo estará entonces compuesto por el módulo ESP32-WROOM como unidad central de procesamiento, contará con dos comunicaciones a través del periférico UART, una para establecer una consola de comandos que permita comunicar al equipo con una computadora y realizar pruebas de funcionamiento y configuraciones y la otra para comunicarse con la pantalla táctil. También establecerá un protocolo de almacenamiento para guardar los programas que el usuario cree en la memoria FLASH disponible. Finalmente contará con un módulo de comunicación sobre protocolo I2C para obtener datos del sensor de humedad y temperatura BME280.

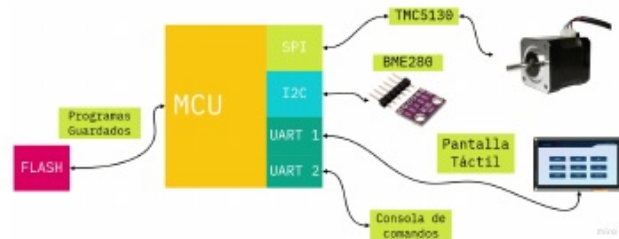


FIGURA 2.8. Esquema de equipo propuesto.

El equipo estará entonces compuesto por el módulo ESP32-WROOM como unidad central de procesamiento, contará con dos comunicaciones a través del periférico UART, una para establecer una consola de comandos que permita comunicarse al equipo con una computadora y realizar pruebas de funcionamiento y configuraciones y la otra para comunicarse con la pantalla táctil. También establecerá un protocolo de almacenamiento para guardar los programas que el usuario cree en la memoria FLASH disponible. Finalmente contará con un módulo de comunicación sobre protocolo I2C para obtener datos del sensor de humedad y temperatura BME280.

2.6. Herramientas de desarrollo

Para la implementación del hardware se utilizó el software libre de diseño de circuitos impresos KICAD [12], la elección del mismo se basó en los siguientes puntos:

- Las capacidades que brinda el software son suficientes para el desarrollo de este hardware.
- Se valora el apoyo del CERN: *European Organization for Nuclear Research* [25] al proyecto KICAD.
- Las últimas versiones presentan mejoras significativas respecto a sus predecesoras.

Para la implementación del firmware se trabajó con el *framework* ESP-IDF [31] provisto por el fabricante del microcontrolador. Dicho entorno se ejecuta sobre FreeRTOS, que es un sistema operativo de tiempo real utilizado en dispositivos embebidos que permite un desarrollo de software bajo un esquema multi-tareas.

Se trabajó con el entorno de programación ECLIPSE IDE, la elección se basó en los siguientes puntos:

- El fabricante del microcontrolador ESPRESSIF ofrece *pluggings* para incorporar al entorno y facilitar el desarrollo.
- Existe documentación para la configuración del *framework* ESP-IDF [26] sobre el entorno.

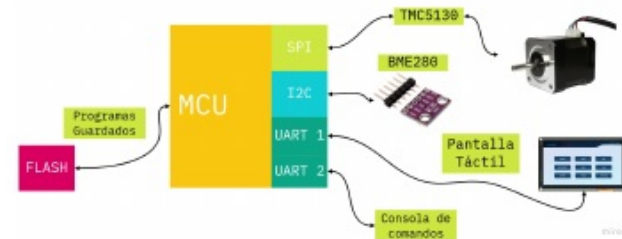


FIGURA 2.8. Esquema de equipo propuesto.

2.6. Herramientas de desarrollo

Para la implementación del hardware se utilizó el software libre de diseño de circuitos impresos KICAD [12], la elección del mismo se basó en los siguientes puntos:

- Las capacidades que brinda el software son suficientes para el desarrollo de este hardware.
- Se valora el apoyo del CERN: *European Organization for Nuclear Research* [25] al proyecto KICAD.
- Las últimas versiones presentan mejoras significativas respecto a sus predecesoras.

Para la implementación del firmware se trabajó con el *framework* ESP-IDF [31] provisto por el fabricante del microcontrolador. Dicho entorno se ejecuta sobre FreeRTOS, que es un sistema operativo de tiempo real utilizado en dispositivos embebidos que permite un desarrollo de software bajo un esquema multi-tareas.

Se trabajó con el entorno de programación ECLIPSE IDE, la elección se basó en los siguientes puntos:

- El fabricante del microcontrolador ESPRESSIF ofrece *pluggings* para incorporar al entorno y facilitar el desarrollo.
- Existe documentación para la configuración del *framework* ESP-IDF [26] sobre el entorno.

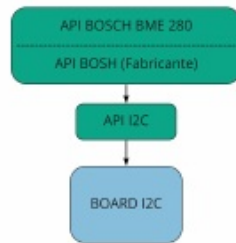


FIGURA 3.19. Módulo API BOSH.

- Dirección del dispositivo I2C.
- Función de lectura.
- Función de escritura.
- Función de delay.
- Configuración de modo normal de funcionamiento del sensor.

Para visualizar los datos registrados por el sensor se implementó sobre la APP TEST una rutina de consulta con llamado a funciones de la capa API BOSH BME, se observa en la siguiente figura 3.20 los datos registrados en consola.

```

TECSCI_SAS      ESP-IDF Console,
Type 'help' to get the list of commands,
Use UP/DOWN arrows to navigate through command history,
Press TAB when typing command name to auto-complete,
Press Ctrl+C will terminate the console environment,

tecsci_dipcoater>
[ (2507) api_bosh_bme280.ct: Temperatura:22.55, Presion:100811.02, Humedad:40.56

```

FIGURA 3.20. Registro de datos en consola.

El desarrollo de este MPV incluyó el registro de variables ambientales pero no un control y corrección de las mismas con un sistema de control. Sin embargo, se pretende ofrecer en un futuro cercano la funcionalidad de cámara de humedad anexada a este MPV. Por tal motivo se presenta en el anexo (XX) el desarrollo de un sistema de control de humedad.

Parámetros de calibración

La carpeta /components/config contiene tres archivos de configuración importantes:

- hardware.h: contiene todas las macros referidas a los pines de conexión del modelo de microcontrolador utilizado.
- os-config.h: contiene las macros de configuración de las tareas y colas de FreeRTOS. Entre otras los tamaños de stack, las prioridades y los periodos de tiempo de ejecución de tareas.

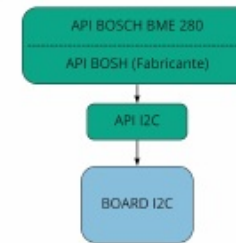


FIGURA 3.19. Módulo API BOSH.

- Dirección del dispositivo I2C.
- Función de lectura.
- Función de escritura.
- Función de delay.
- Configuración de modo normal de funcionamiento del sensor.

Para visualizar los datos registrados por el sensor se implementó sobre la APP TEST una rutina de consulta con llamado a funciones de la capa API BOSH BME, se observa en la siguiente figura 3.20 los datos registrados en consola.

```

TECSCI_SAS      ESP-IDF Console,
Type 'help' to get the list of commands,
Use UP/DOWN arrows to navigate through command history,
Press TAB when typing command name to auto-complete,
Press Ctrl+C will terminate the console environment,

tecsci_dipcoater>
[ (2507) api_bosh_bme280.ct: Temperatura:22.55, Presion:100811.02, Humedad:40.56

```

FIGURA 3.20. Registro de datos en consola.

El desarrollo de este MPV incluyó el registro de variables ambientales pero no un control y corrección de las mismas con un sistema de control. Sin embargo, se pretende ofrecer en un futuro cercano la funcionalidad de cámara de humedad anexada a este MPV.

Parámetros de calibración

La carpeta /components/config contiene tres archivos de configuración importantes:

- hardware.h: contiene todas las macros referidas a los pines de conexión del modelo de microcontrolador utilizado.
- os-config.h: contiene las macros de configuración de las tareas y colas de FreeRTOS. Entre otras los tamaños de stack, las prioridades y los periodos de tiempo de ejecución de tareas.



FIGURA 4.10. 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 4.13 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 4.11. Ensayo de desplazamiento lineal.



FIGURA 4.10. 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.



FIGURA 4.11. Ensayo de desplazamiento lineal.

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.



FIGURA 4.12. Ensayo completo en laboratorio.

4.4. Caso de prueba

4.5. Prueba de campo con personal capacitado

El ensayo consistió en realizar un procedimiento completo de uso sobre el equipo dip coater con personal capacitado del Instituto de Nanosistemas.

La prueba implicó 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. La prueba se realizó en el laboratorio Nanoatelier del Instituto de Nanosistemas de la Unsam, se observa en la figura 4.12 el equipo instalado. Se incorporó sobre el equipo una cámara de acrílico para generar un ambiente aislado.



FIGURA 4.12. Ensayo completo en laboratorio.

Para realizar el experimento se siguió la siguiente secuencia:

1. Se conectó la cámara de acrílico del equipo a un suministro de aire comprimido. El suministro pasa por un filtro de sílica gel que baja la humedad del aire suministrado.
2. Se colocó un wafer de silicio sobre el carro del equipo y una solución dentro de una caja plástica debajo del carro como se observa en la figura 4.13.
3. Se encendió el equipo y el usuario configuró los parámetros del proceso a pie de máquina sobre la pantalla táctil.

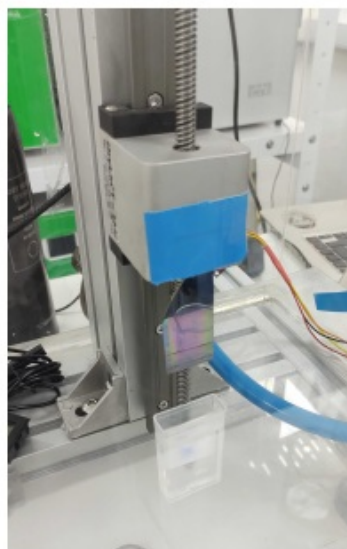


FIGURA 4.13. Ensayo con wafer de silicio.

4. En paralelo se controló la humedad de la cámara sobre la consola serial de un ordenador conectado al equipo.
5. Se esperó hasta lograr una humedad dentro de la cámara de 20 %.
6. Se inicio el proceso de dip coating.
7. Al finalizar se extrajo la muestra.

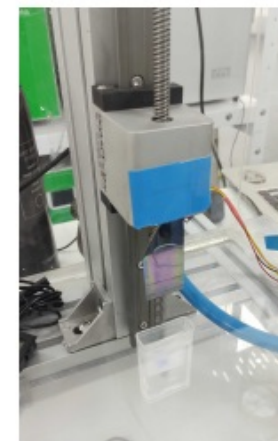


FIGURA 4.13. Wafer de silicio sobre carro.

Con este ensayo se pudo corroborar el funcionamiento correcto del equipo de manera integral, se destacó que los usuarios investigadores realizaron de manera intuitiva una correcta configuración de equipo. En la figura 4.14 se observa el primer *film* producido por el equipo. Los usuarios comentaron que el perfil visual que observaron sobre la muestra contaba con todas las características de un *film* correctamente fabricado.

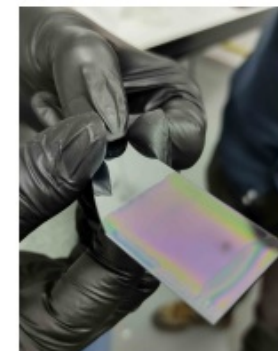


FIGURA 4.14. Ensayo final.

Capítulo 5

Conclusiones

En esté 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 desarrollos. 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 de equipo dip coater que cuanta con las características suficientes para satisfacer las demandas de primeros usuarios. Se señalan a continuación los siguientes logros en el desarrollo del presente trabajo:

- Diseño y fabricación de un lote de cinco unidades con la primera versión de placa electrónica.
- Desarrollo de un firmware modular que cumple con todos los requerimientos y permite incorporar nuevas funcionalidades sin cambios importantes en la estructura.
- Generación de capacidad técnica suficiente para la fabricación de 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 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 incorporando los cambios mencionados en la sección 3.1.

4.6. Comparación con el estado del arte

4.6. Comparación con el estado del arte

En está sección se realiza una comparación del equipo fabricado respecto a los equipos comerciales presentados en la sección 1.3.

Se incorpora en la tabla 4.4 la columna *open source hardware* por la importancia que está especificación brinda al desarrollo del presente equipo.

TABLA 4.4. Comparación de especificaciones técnicas.

Equipo	Recorrido	Velocidad (mm/min)	Aceleración (m/min2)	Interface	Open Source Hardware
Bio Single	300 mm	1 - 1000	no	PC	no
Bio Multiplie	70 mm	0.1 - 108	no	PC	no
Kibron LayerX	134 mm	0.06 - 300	no	PC	no
Bungard	600 mm	30 - 10000	no	Display LCD	no
Ossila	100 mm	0.6 - 3000	no	PC	no
Holmarc	100 mm	1.08 - 540	no	PC	no
Este Equipo	300 mm	1-800	si	Touch-PC	si

Se destacan aspectos únicos que diferencian este equipo respecto a los comerciales:

1. Puede realizar experimentos con control de la variable aceleración.
2. Se configura fácilmente a través de una pantalla táctil y también permite la configuración desde un ordenador.
3. Toda la información del equipo esta disponible, esto permite que el usuario aproveche todo el recurso según sus necesidades.

- Se incorporará un módulo de software para controlar parámetros de humedad, que será integrado con el desarrollo futuro de una cámara de humedad compatible con este equipo.
- Durante el mes de octubre 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 trabaja en conjunto con un diseñador industrial para convertir este MVP en un producto comercial de la empresa TECSCI, el la figura 5.1 se muestra el diseño que se está evaluando fabricar.



FIGURA 5.1. Render de equipo comercial.

Bibliografía

- [1] Technology for Science. *TECSCI*. Visitado el 18-06-2022. URL: <https://www.tecsci.com.ar/>.
- [2] OSH. *Open Source Hardware Association*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.oshwa.org/definition/spanish/>.
- [3] Martin Abel Gambarotta. *Firmware*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://gitlab.com/tecsci/dipcoater>.
- [4] Martin Abel Gambarotta. *Hardware*. Visitado el 15-03-2022. URL: https://github.com/martinch14/tecsci_dipcoater_hardware_kicad.
- [5] Nadetech. *Dip coating process*. Visitado el 23-03-2022. URL: <https://nadetech.wordpress.com/2017/05/18/dip-coating/>.
- [6] Kibron. *Dip coater*. Visitado el 04-01-2022. URL: <https://www.kibron.com/layerx-134>.
- [7] Biolin Scientific. *Dip coater*. Visitado el 04-01-2022. URL: <https://www.biolinscientific.com/ksvlima/fabrication-and-deposition-of-thin-films/dip-coaters>.
- [8] Bungard. *Dip coater machine*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.bungard.de/en/machines/dip-coaters/rdc-15>.
- [9] Ossila. *Dip coater machine*. Visitado el 08-03-2022. URL: <https://www.ossila.com/products/dip-coater>.
- [10] Holmarc. *Dip coater machine*. Visitado el 10-03-2022. URL: https://www.holmarc.com/dip_coating_unit.php.
- [11] Trinamic. *Motion Control*. URL: <https://www.trinamic.com/>.
- [12] Kicad. *Open Source Electronics Design*. URL: <https://www.kicad.org/>.
- [13] 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>.
- [14] Nanotec. *Nema17*. Visitado el 29-03-2022. URL: <https://en.nanotec.com/products/250-st4118-stepper-motor-nema-17>.
- [15] Analog Devices. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.analog.com/en/index.html>.
- [16] Trinamic Motion Control. *TMC5130*. URL: <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc5130a-ta/>.
- [17] *TMC5130. Schematic*. URL: <https://www.trinamic.com/support/eval-kits/details/tmc5130-eval/>.
- [18] Stoneitech. *HMI Stone Display*. URL: <https://www.stoneitech.com/>.
- [19] Perfiles de aluminio. *.Net*. Visitado el 22-03-2022. URL: <https://perfilesdealuminio.net/>.
- [20] Igus. *Plastics for longer life*. URL: <https://www.igus.com.ar/>.
- [21] Bobcad. *Bobcad CAD/CAM*. URL: <https://bobcad.com/>.
- [22] Fagor. *Fagor Automation*. URL: <https://www.fagorautomation.com/>.
- [23] Norma RS-274. *G-Code*. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=823374.

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 desarrollos. 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 de equipo dip coater que cuanta con las características suficientes para satisfacer las demandas de primeros usuarios. Se señalan a continuación los siguientes logros en el desarrollo del presente trabajo:

- Diseño y fabricación de un lote de cinco unidades con la primera versión de placa electrónica.
- Desarrollo de un firmware modular que cumple con todos los requerimientos y permite incorporar nuevas funcionalidades sin cambios importantes en la estructura.
- Generación de capacidad técnica suficiente para la fabricación de 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 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 incorporando los cambios mencionados en la sección 3.1.

- [24] ESP. *Espressif*. Visitado el 23-03-2022. URL: <https://www.espressif.com/>.
- [25] Antonella Del Rosso. *KiCad software gets the CERN treatment*. 2015. URL: <https://home.cern/news/news/computing/kicad-software-gets-cern-treatment>.
- [26] ESP-IDF over Eclipse IDE. Visitado el 13-05-2022. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/release-v3.0/get-started/eclipse-setup.html>.
- [27] NodeMCU. *Open Source Hardware*. Visitado el 24-03-2022. URL: <https://github.com/nodemcu/nodemcu-devkit-v1.0>.
- [28] CERN. *Open Hardware Licence*. URL: <https://ohwr.org/cernohl>.
- [29] Ernesto Mayer S.A. *Fabricante de circuitos impresos*. URL: <https://www.mayerpcb.com/>.
- [30] Asembli. *Montaje de Componentes*. URL: <https://www.asembli.com/>.
- [31] ESP-IDF. *Framework Espressif*. Visitado el 13-05-2022. URL: <https://github.com/espressif/esp-idf>.
- [32] Protocolo de comunicación STONE. *Protocolo STONE*. Visitado el 24-03-2022. URL: <https://www.stoneitech.com/wp-content/uploads/2022/06/Instruction-Sets-V1.5RC-20220615.pdf>.
- [33] Api Bosh. Visitado el 10-07-2022. URL: https://github.com/BoschSensortec/BME280_driver.
- [34] Asimeto. Visitado el 10-07-2022. URL: <https://www.asimeto.com/product-IP65-Digital-Indicators-Series-407.html>.

- Se incorporará un módulo de software para controlar parámetros de humedad, que será integrado con el desarrollo futuro de una cámara de humedad compatible con este equipo.
- Durante el mes de octubre 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 trabaja en conjunto con un diseñador industrial para convertir este MVP en un producto comercial de la empresa TECSCI, el la figura 5.1 se observa el diseño que se está evaluando fabricar.



FIGURA 5.1. Render de equipo comercial.