

CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS EMBEBIDOS

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

Equipo dip coater para la creación de películas delgadas

Autor:
Ing. Martin Abel Gambarotta

Director:
Dr. Gastón Corthey (CONICET)

Jurados:
Alejandro Permingeat (FIUBA, DETECAP)
Diego Fernández (UBA)
Julián Iglesias (UTN)

*Este trabajo fue realizado en la Ciudad de General San Martín, Buenos Aires,
entre marzo de 2020 y abril de 2022.*

Resumen

La presente memoria describe el desarrollo y la implementación de un equipo dip coater utilizado en la fabricación de películas delgadas en el campo de estudio de las nanociencias. Se abarcarán aspectos de software, hardware y también de diseño y fabricación mecánica.

El equipo que surge de este proyecto será comercializado por TECSCI S.A.S en el transcurso del año 2022. Todo el material relacionado estará disponible ya que la empresa adhiere a los principios del software y hardware libre.

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. Fabricación	20
3.2. Firmware	21
3.2.1. Capas de abstracción	21
3.2.2. Módulos principales	22
Módulo coating	22
Módulo de consola	22
Módulo hmi	22
Módulo de calibración	22
3.3. Estructura mecánica	23
3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecanizado CNC	23
3.3.2. Modelos 3D y real	25
4. Ensayos y resultados	27
4.1. Pruebas funcionales de hardware y rediseño	27
4.1.1. Comunicación con periféricos	27
4.1.2. Ensayo de funcionamiento continuo	27
4.2. Pruebas funcionales firmware y rediseño	27
4.2.1. Tiempo de ejecución de programas	27
4.3. Calibración del equipo	27
4.3.1. Desplazamiento lineal y micropasos	27
4.4. Pruebas de campo con personal capacitado	27

5. Conclusiones	29
5.1. Resultados obtenidos	29
5.2. Próximos pasos	29
Bibliografía	31

Índice de figuras

1.1.	Centro Tecnológico FUNINTEC.	2
1.2.	Proceso completo desarrollado por el equipo ¹	2
1.3.	Films de dioxido 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.	Clock para el CI TMC5130.	17
3.2.	Módulo de entrada.	18
3.3.	CI TMC5130.	18
3.4.	Conversor UART-USB.	19
3.5.	Modelo 3D Kicad.	19
3.6.	Placa fabricada MAYER SRL.	20
3.7.	Capas de abstracción de software.	21
3.8.	Pieza personalizada soporte de carro.	23
3.9.	Piezas personalizada soporte de estructura superior.	23
3.10.	Estrategias de mecanizado en software Bodcad.	24
3.11.	Modelo 3D.	25
3.12.	Primer prototipo dip coater TECSCI.	26
4.1.	Ensayo de desplazamiento lineal con micrómetro.	28
4.2.	Micrómetro digital Asimeto.	28

Índice de tablas

1.1. Dip coaters en el mercado	5
2.1. Comparación Stone	12

Dedicado a mis padres!

Capítulo 1

Introducción general

En este capítulo se explica brevemente el marco en el cual se desarrolló el trabajo y se dan las primeras definiciones sobre el equipo construido.

1.1. Contexto

El trabajo consistió en la construcción de un equipo comercial *dip coater*. El trabajo se desarrolló en el marco de la fundación de la empresa TECSCI (*Technology for Science*).

La empresa tiene como visión ser referente internacional en el desarrollo de equipamiento científico y como misión pretende fabricar productos innovadores de alta calidad. Espera poder dar respuesta a las demandas de laboratorios de investigación, universidades y empresas de base tecnológica nacionales e internacionales.

Como valor agregado destacamos que la empresa adhiere a la filosofía del software y hardware libre [1], por lo tanto, el lector podrá acceder a todo el código fuente del firmware [2] y también a los archivos de diseño y fabricación del circuito impreso [3] necesarios para replicar, reparar o adaptar a sus necesidades el equipo.

Las soluciones que propone se orientan a dar respuesta a las problemáticas que se comparten tanto en el mercado local como en el internacional:

- Elevado precio del equipamiento científico y mantenimiento.
- Contratación exclusiva de servicio técnico asociado al fabricante.
- Soluciones de software y hardware cerradas que no permiten la adaptación del instrumental a experimentos científicos personalizados.

La empresa está incubada en FUNINTEC (Fundación Unsam Innovación y Tecnología) y sus instalaciones se encuentran dentro del Campus Miguelete en la UNSAM (Universidad Nacional de San Martín).

El impacto de esta incubación es positivo, ya que brinda herramientas para poder llevar a cabo los trabajos mecánicos necesarios para la fabricación del equipo. En la figura 1.1 podemos ver el taller mecánico donde se pueden fabricar todo tipo de piezas a través del mecanizado CNC (*Computer Numerical Control*), necesarias en una etapa de prototipado y también con la posibilidad de poder escalarlo hacia una etapa de producción.



FIGURA 1.1. Centro Tecnológico FUNINTEC.

La empresa también cuenta con un laboratorio de electrónica con equipos para diseño y prototipado electrónico.

1.2. Técnicas de dip coating

En los laboratorios de investigación aplicados en nanotecnologías existen diferentes equipos para la fabricación de películas delgadas o *thin films* que consisten en capas de material de espesores variables, que comúnmente van desde las centenas de nanómetros hasta las decenas de micrómetros y se depositan sobre diferentes superficies.

Dip coating es una técnica que se emplea tanto en áreas de I+D (investigación y desarrollo) en la industria, como en la investigación científica en el campo de las nanociencias, se basa en la inmersión y extracción controlada de un sustrato en una solución química bajo estudio. En la figura 1.2 se observa una ejecución completa del movimiento desarrollado por el equipo.

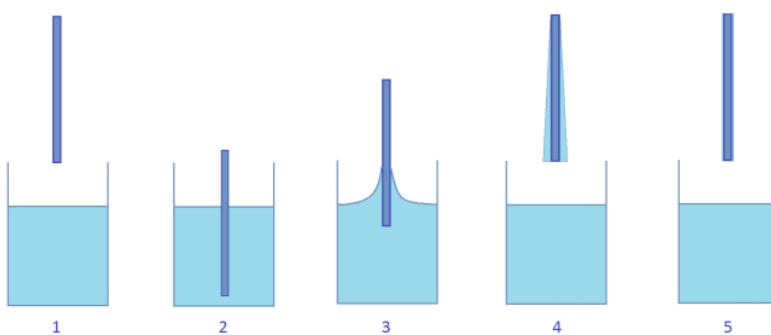


FIGURA 1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo ¹.

1. La muestra desciende a velocidad controlada.
2. La muestra queda sumergida un tiempo establecido por el usuario.
3. La muestra asciende a velocidad controlada, este es el punto más crítico del experimento, en donde el material queda adherido a la muestra, se estudiará en el capítulo 3 dos modelos matemáticos que explican este fenómeno

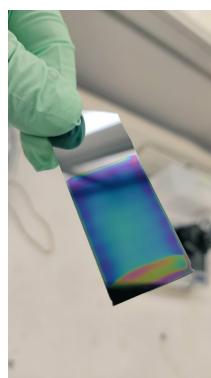
¹Imagen tomada de [4]

y se dará una noción mas detallada de las velocidades que caracterizan el proceso.

4. Se extrae toda la muestra.
5. El usuario puede tener interés o no, en volver a repetir el proceso un tiempo después.

La principal característica del equipo es darle al usuario la posibilidad de controlar la velocidad y aceleración de inmersión de la muestra, el tiempo de espera que la muestra queda sumergida y la extracción, teniendo la posibilidad de repetir el ciclo según se desee.

Como ejemplo de los resultados que se obtienen aplicando esta técnica podemos observar en la figura 1.3 films de dioxido de titanio TiO_2 . En la imagen A el film se preparó sobre un wafer de silicio y en la imagen B sobre un portaobjeto de vidrio.



(A) Film sobre wafer de silicio.



(B) Film sobre portaobjeto.

FIGURA 1.3. Films de dioxido de titanio TiO_2 ².

Cabe destacar que los espesores logrados en este experimento fueron entre 180 nm y 200 nm y la velocidad de inmersión y extracción de los sustratos de 180 mm/min.

Luego de un proceso dip coating, dependiendo del tipo de muestra que se genere, es necesario realizar tratamientos térmicos para finalizar el proceso, que se realizan con otro tipo de equipos y por lo tanto no serán parte de esta memoria.

1.3. Dip coaters en el mercado

Existen diferentes fabricantes a nivel internacional que comercializan este tipo de equipos pero ninguno a nivel local. Se presentan a continuación algunos equipos de diferentes fabricantes.

Podemos observar en la figura 1.4 el equipo de la empresa Kibron [5].

En la figura 1.5 podemos ver los equipos de la empresa Biolin Scientific [6], un equipo simple y otro con mayor funcionalidad. Si bien ambos controlan con exactitud la velocidad de inmersión y extracción, el último agrega una funcionalidad extra, que a través de una rotación en la base da la posibilidad de cambiar de

²Imagen tomada en los laboratorios del Instituto de Nanosistemas de la UNSAM.



FIGURA 1.4. Equipo de la empresa Kibron.

manera automática y secuencial las soluciones donde se realizan las inmersiones. Ambos equipos necesitan estar conectados a una computadora corriendo un software para poder ser accionados.



(A) Equipo simple.



(B) Equipo avanzado.

FIGURA 1.5. Equipos de la empresa Biolin Scientific.

Por último presentamos el equipo de la empresa Bungard [7], que puede observarse en la figura 1.6. Este equipo a diferencia de los otros cuenta con un display LCD y botonera, que permite al usuario realizar una configuración a pie de máquina.



FIGURA 1.6. Equipo de la empresa Bungard.

A continuación se presenta la tabla 1.1 en donde se comparan las especificaciones técnicas que los caracterizan.

Podemos entonces extraer algunas conclusiones, ninguno de los equipos permite al usuario tener control sobre la aceleración en los movimientos de inmersión y extracción de muestra, la mayoría de los equipos depende de una comunicación

TABLA 1.1. Especificaciones técnicas de otros equipos.

Equipo	Recorrido	Velocidad (mm/min)	Aceleración (m/min ²)	Interface
Bio Single Vessel M	300 mm	1 - 1000	no	PC
Bio Multiplie Vessel	70 mm	0.1 - 108	no	PC
Kibron LayerX	134 mm	0.06 - 300	no	PC
Bungard	600 mm	30 - 10000	no	Display LCD
Ossila [8]	100 mm	0.6 - 3000	no	PC
Holmarc [9]	100 mm	1.08 - 540	no	PC

USB-SERIAL con una computadora para poder ser ejecutados, ninguna de las empresas adhiere a los principios del software y hardware libre.

1.4. Objetivos y alcance

1.4.1. Objetivos

El objetivo de este trabajo fue diseñar y fabricar el primer equipo comercial de la empresa TECSCI, con la perspectiva a futuro de ampliar la gama ofrecida de equipos de laboratorio para la investigación científica.

También es parte de los objetivos fundamentales que el equipo desarrollado incorpore mejoras respecto a sus competidores. Se planteará en los siguientes capítulos un estudio sobre el control de movimientos elegido y se presentará un sistema moderno de configuración de equipo.

1.4.2. Alcance

El presente trabajo incluye la presentación de un equipo comercial dip coater.

Abarcó los siguientes puntos:

- Driver de motor provisto por el fabricante TRINAMIC [10].
- Diseño de hardware con software de diseño KICAD [11].
- Fabricación de placa electrónica y montaje de componentes.
- Diseño y fabricación de partes mecánicas a través del mecanizado de aluminio.
- Incorporación de pantalla táctil para configuración y uso del equipo.

El trabajo no incluyó:

- Desarrollo de hardware con fuente de alimentación incorporada.
- Programación de la interfaz gráfica con el software de diseño provisto por el fabricante de la pantalla.
- Control del entorno con registro de humedad, temperatura y cámara de humedad.

Capítulo 2

Introducción específica

En el presente capítulo se introducen los módulos principales del equipo dip coater fabricado.

2.1. Estudio preliminar

Para entender la relación entre la velocidad de extracción y el espesor de material depositado se tuvo en consideración la siguiente publicación (*Preparation of Sol-Gel Films by Dip-Coating*) [12], que describe la técnica dip coating como un proceso dinámico, complejo, difícil de modelar, debido a los gradientes de concentración y viscosidad generados por evaporación de la solución.

La publicación se basa entonces en un estudio semi-experimental sobre varias soluciones químicas para predecir el espesor final de la película. Tiene en cuenta dos modelos matemáticos, un modelo de capilaridad asociado a extracciones en velocidades bajas y otro modelo de evaporación asociado a velocidades altas respecto al rango de estudio.

Se observa en la figura 2.1 la variación de los espesores fabricados respecto a velocidades utilizadas, también se puede observar la relación entre los diferentes modelos aplicados.

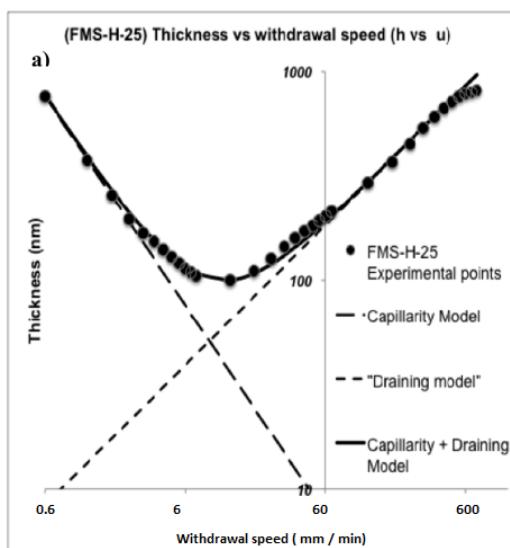


FIGURA 2.1. Espesor vs velocidad ¹.

¹Imagen tomada de [12].

Los resultados del experimento concluyen que existe linealidad en la relación de espesor respecto 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 remarcaba 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 [13] para realizar los movimientos.
- Se utilizará un driver de motor de la marca TRINAMIC.

Trinamic Motion Control [10] se especializa en la fabricación de CI (Circuitos Integrados) para el control de diferentes tipos de motores, su lema 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 [14].

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 [15].

Todos los CI requieren una configuración inicial de parámetros, que dependen del tipo de motor y de la carga asociada al mismo. Es por eso que la empresa ofrece el software TMCL-IDE y diferentes placas de desarrollo para ayudar a realizar una correcta configuración de parámetros. La placa de desarrollo para este integrado es la *TMC5130-Eval Evaluation Board* [16].

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. Finalmente el motor paso a paso se conecta a la placa de evaluación.

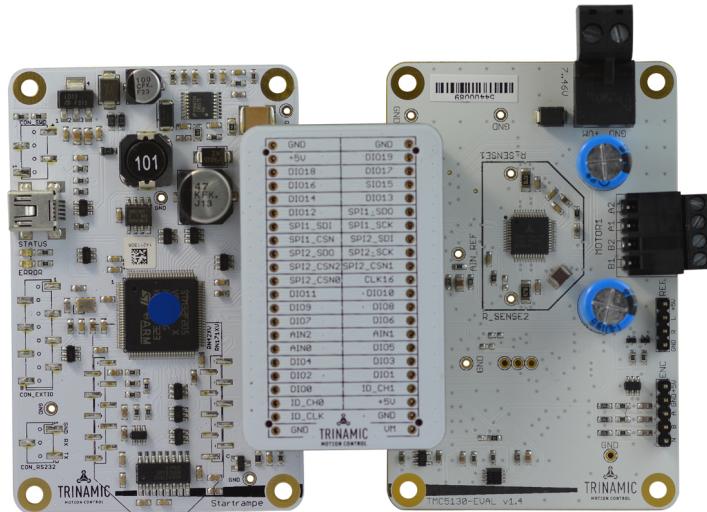


FIGURA 2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130².

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, por lo tanto la corriente es suficiente. Se realizarán en el capítulo 4 los respectivos ensayos.

Podemos observar en la figura 2.3 el diagrama en bloque del CI.

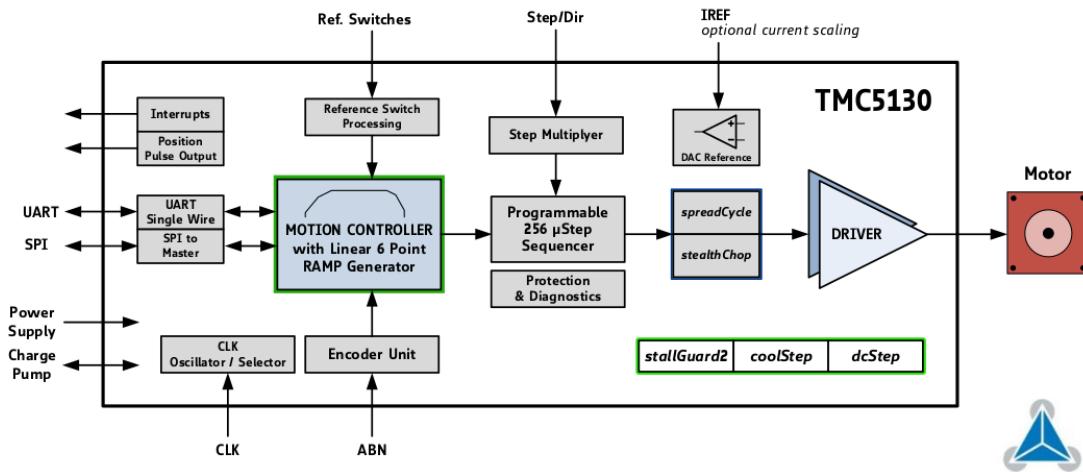
La comunicación con el CI se puede establecer a través del protocolo *UART* (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) o *SPI* (*Serial Peripheral Interface*), para el desarrollo de este trabajo se utilizó el protocolo de comunicación SPI.

Una característica importante a destacar es la posibilidad de programar la cantidad de pasos que da el motor. Los pasos están relacionados con las fases y con la cantidad de dientes que tiene el rotor y estator del motor. 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 dice que el paso es de (1.8°), esto significa que por cada vuelta de motor (360°) el motor 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

²Imagen tomada de [10].

³Imagen tomada de [10].

FIGURA 2.3. Diagrama en bloques TMC5130³.

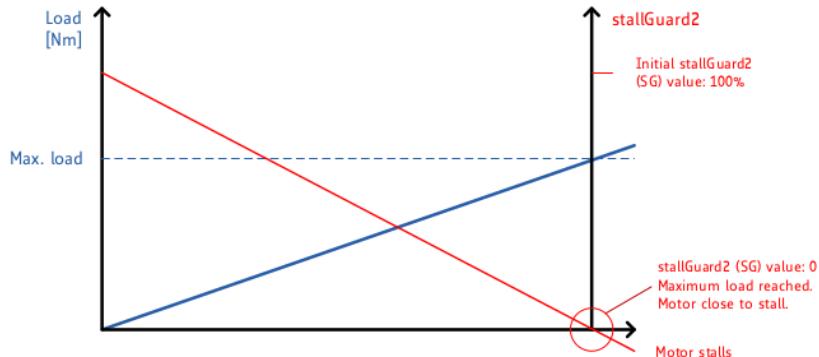
256 micropasos por cada paso del motor. Siguiendo con el ejemplo recién presentado, para un motor de paso (1.8°) tendríamos en total 51200 micropasos como se observa en la ecuación 2.1.

$$(360/1,8) * 256 = 51200 \text{ micropasos por revolución} \quad (2.1)$$

El motor estará acoplado a un eje lineal que generará movimientos ascendentes y descendentes. Sobre este eje lineal se acoplará un carro de aluminio que tendrá una pinza que sostendrá las muestras.

Otra funcionalidad que se utilizará es *stallguard2*, una función de alta precisión 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

⁴Imagen tomada de [10].

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 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, cuyo efecto reduce la energía suministrada según hojas de datos [15] hasta un 75 %. Incluso en aplicaciones en donde la carga es constante como es este equipo dip coater ya que la carga variable representada por un wafer de silicio o un portaobjeto es completamente despreciable.

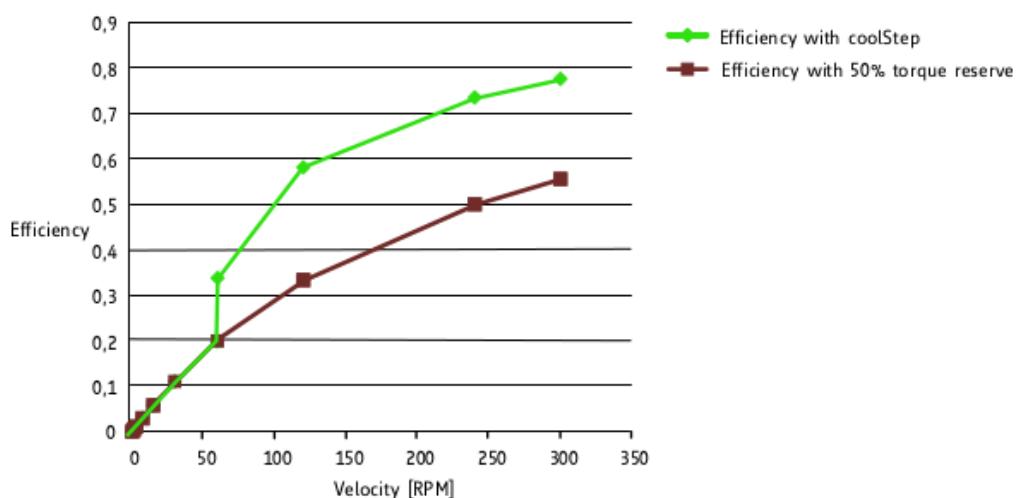


FIGURA 2.5. Función coolstep.⁵

Por último se utilizará la función *dcStep*, que es un modo de conmutación automática que ajusta la velocidad del motor en caso de existir cierta sobrecarga sobre 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 conectado. El acceso a los registros se realizará a través del protocolo SPI. En el capítulo 3 de darán más detalles de los registros configurados con la ayuda del software TMCL-IDE.

2.3. Interfaz de usuario

Respecto a la interfaz usuario-máquina surgió en reuniones con el cliente la necesidad de contar con una interfaz moderna, que permita a un usuario dentro de un laboratorio configurar el equipo a pie de máquina.

Dando lugar al siguiente requerimiento:

⁵Imagen tomada de [10].

- 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)*, este tipo de pantallas incorpora una unidad de procesamiento que se encarga 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 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 [17]. El fabricante ofrece un catálogo amplio de pantallas que caracteriza según el tipo 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 detalla 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 UART.

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 [18], 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 guía 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 [19], que se especializa en la fabricación de polímeros. La empresa ofrece guías lineales que se deslizan en lugar de rodar, es decir no tienen rodamientos. Los polímeros están combinados con materiales anticorrosivos y no requieren 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 [20] CAD/CAM (*Computer-Aided Design /Computer-Aided Manufacturing*). Un software utilizado en la industria manufacturera compuesto 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, para poder 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 (*Computer Numerical Control*) de la marca FAGOR [21] utilizada para la fabricación de las piezas del equipo dip

⁶Imagen tomada de [19].

coater. El control de la fresadora interpreta el código G-CODE también conocido como RS-274 [22] generado por el modulo CAM y lo convierte en los respectivos movimientos de motores.



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 deberá utilizar un 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.
- Deberá registrar variables de 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 [23]. El ESP32 es un módulo del tipo *SoC (System On Chip)*, es decir que además de la unidad de procesamiento integra conectividad inalámbrica con sus periféricos de Wi-Fi y bluetooth y una memoria FLASH para almacenamiento de datos y programa.

⁷Imagen tomada en el centro tecnológico de FUNINTEC.

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

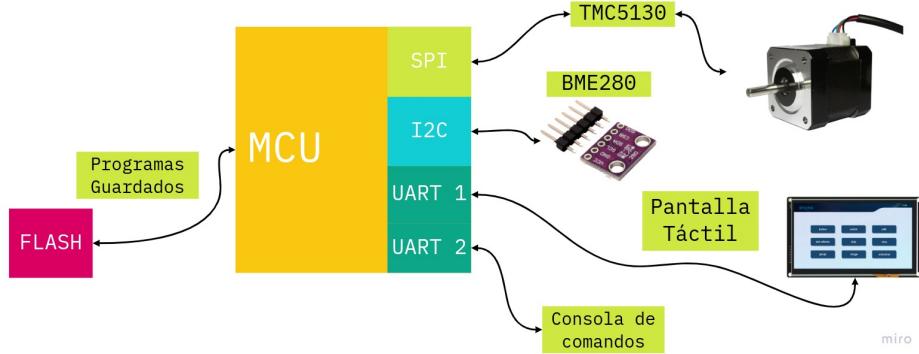


FIGURA 2.8. Esquema de equipo propuesto.

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 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 y finalmente contará con un módulo de comunicación sobre protocolo I2C para obtener datos del sensor de humedad y temperatura BME280.

Capítulo 3

Diseño e Implementación

En el siguiente capítulo se presentará el diseño y la implementación de las tres partes fundamentales del equipo. Se abarcarán aspectos de hardware, firmware, diseño y fabricación mecánica.

3.1. Hardware

3.1.1. Diseño basado en módulos de hardware libre

Para la implementación del hardware se utilizó el software libre de diseño de circuitos impresos KICAD [11], que en sus últimas versiones presenta mejoras significativas respecto a sus predecesoras.

El diseño de la placa electrónica se baso en el estudio de los siguientes módulos:

- NodeMCU [24]
- TMC5130-EVAL [16]

Se destaca que ambos proyectos adhieren a la filosofía del hardware libre por lo tanto se pudieron descargar y estudiar los diagramas esquemáticos de ambas placas.

El módulo TMC5130-EVAL como se describió en la sección 2.2 contiene al CI TMC5130. Del estudio de esta placa de evaluación se extrajeron las configuraciones necesarias para lograr la correcta utilización del driver. Se tuvieron en cuenta las recomendaciones de diseño establecidas por el fabricante como por ejemplo la incorporación de un clock externo de 16 MHz como se observa en la figura 3.1 el cual es necesario en aplicaciones de alta precisión.

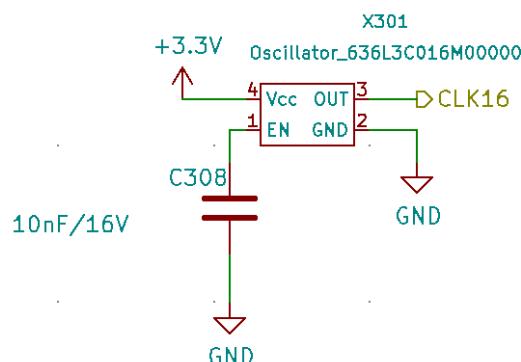


FIGURA 3.1. Clock para el CI TMC5130.

Otra etapa importante como se observa en la figura 3.2 es el regulador de tensión que permite alimentar al equipo con tensiones continuas entre 24 V y 46 V. El equipo se diseño para ser alimentado con una fuente de alimentación externa simplificando así cuestiones regulatorias de certificación que deben cumplir equipos que se alimentan directamente con 220 V de tensión alterna.

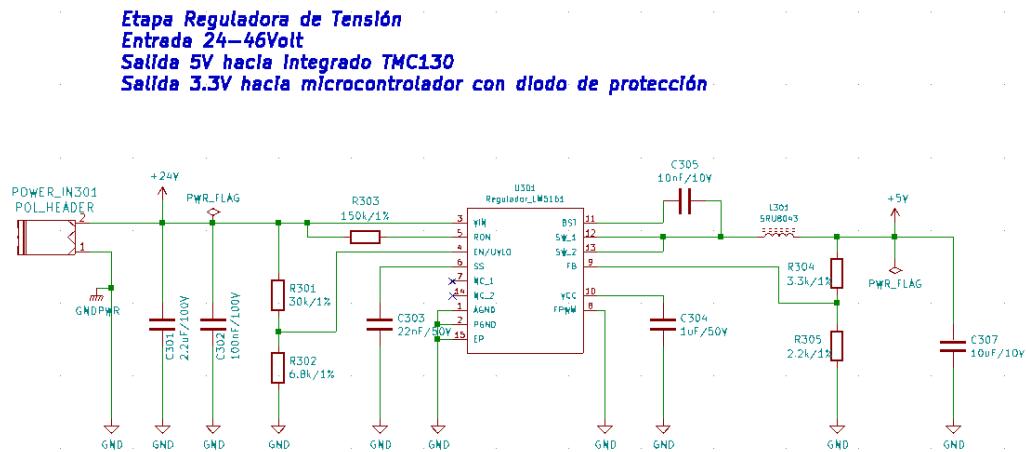


FIGURA 3.2. Módulo de entrada.

A continuación observamos en la figura 3.3 las conexiones del driver con el motor paso a pasos y el puerto SPI utilizado para la comunicación con el microcontrolador.

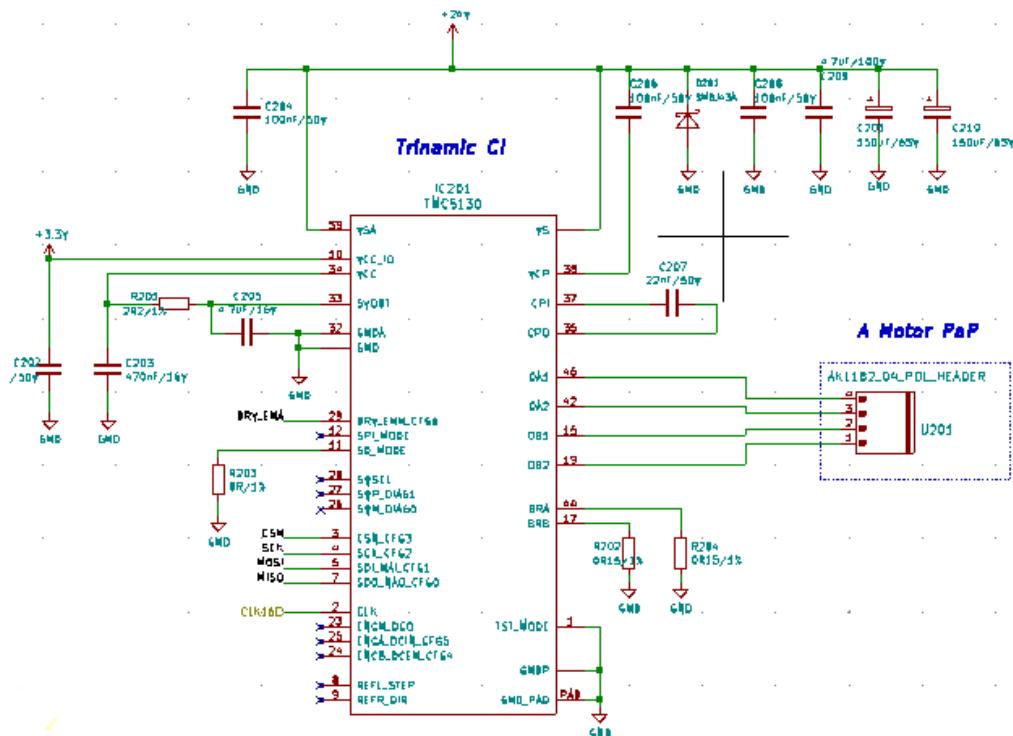


FIGURA 3.3. CI TMC5130.

El cuanto al módulo NodeMCU es una placa de desarrollo que contiene el SoC ESP32-WROOM, del estudio de su diseño se implementó la etapa del conversor

SERIAL-USB como se observa en la figura 3.4 que permite conectar el módulo directamente a un puerto USB de computadora para descargar el firmware y establecer una comunicación a través del periférico UART. Esto nos evita tener que contar con un programador externo para comunicarnos con el equipo.

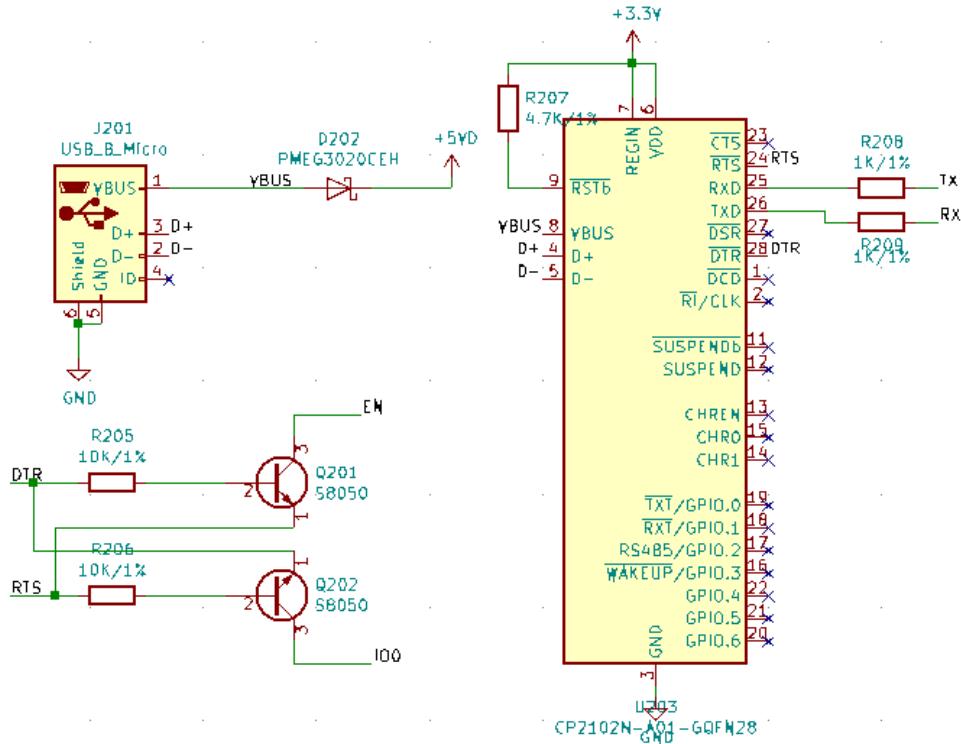


FIGURA 3.4. Conversor UART-USB.

Finalmente podemos observar en la figura 3.5 el diseño 3D generado por el software KICAD cuyo diseño esta disponible en los repositorios de la empresa TECS-CI [3]. La placa electrónica de este equipo dip coater cuenta con licencia CERN OHL v.1.2 [25].

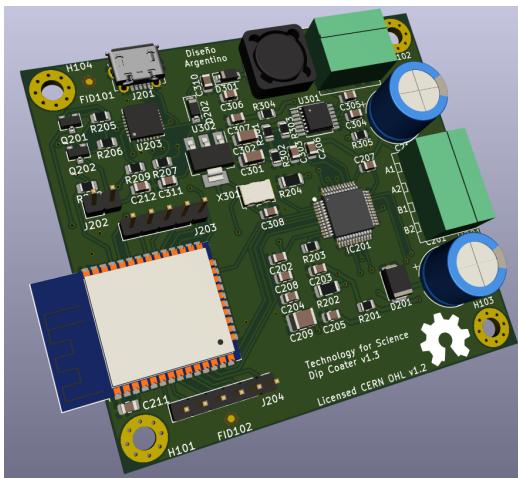


FIGURA 3.5. Modelo 3D Kicad.

3.1.2. Fabricación

La placa electrónica se fabricó con el proveedor local de circuitos impresos Ernesto Mayer S.A. [26]. A continuación se presenta la información de diseño de la placa y de describen algunas restricciones de diseños impuestas por el fabricante:

- Grilla de posicionamiento principal: 0.25mm
- Grilla de ruteo principal: 0.25mm
- Agujeros de montaje: 3.2mm
- Pistas principales: 0.5mm
- Pistas inferiores: 0.25mm (límite particular 8mils(0.20mm))
- Pistas superiores: 0.8mm
- Vías: 0.8mm/0.4mm (límite particular 8mils(0.20mm))
- Margen general: 0.22 mm
- Margen particular: 0.2 mm (límite particular 8 mils(0.20mm))
- Fabricación: espesor 1.6mm FR4
- Restricciones generales del fabricante: estándar 10 mils

Luego de fabricar el PCB, se continuó con el montaje de componentes electrónicos superficiales que estuvo a cargo de la empresa Asembli S.A. [27]. Se fabricó un primer lote de cinco placas.



FIGURA 3.6. Placa fabricada MAYER SRL.

3.2. Firmware

3.2.1. Capas de abstracción

Para la implementación del firmware se trabaja con el *framework* ESP-IDF FreeRTOS [28] provisto por el fabricante del microcontrolador. FreeRTOS es un sistema operativo de tiempo real que permite la programación de software *multi-threaded*. En la sección 3.2.2 se detallarán los módulos del framework utilizados.

Se desarrolló un firmware modular que atomiza el funcionamiento en diferentes bloques de software, lo cual permite incorporar código de manera incremental y ordenada. Se observa en la figura 3.7 las capas de abstracción de software implementadas.

La idea principal es no permitir llamados a funciones entre capas que no son continuas. La capa superior de aplicaciones solo puede hacer llamados a funciones de la capa dos o capa *API(Application Programming Interfaces)* y la capa dos solo puede hacer llamado a funciones de la capa inferior o capa *Board*.

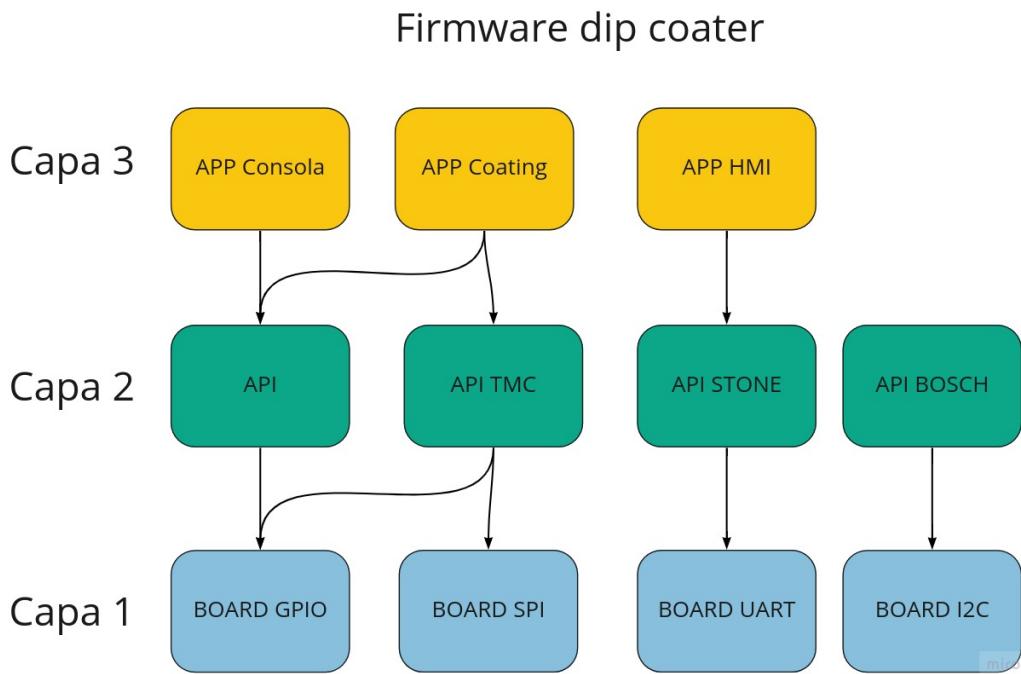


FIGURA 3.7. Capas de abstracción de software.

La capa uno interacciona con los módulos de hardware del microcontrolador, es decir que esta capa es la única que contiene todos los llamados a funciones disponibles en el framework ESP-IDF, como por ejemplo llamados a periféricos UART , SPI, I2C entre otros. En el caso de que en un futuro se quiera realizar un cambio de microcontrolador, esta sería la única capa que debería reescribirse en mayor medida, permitiendo así reutilizar el software escrito en capas superiores.

La capa dos esta compuesta por bloques de código provistos por los fabricantes de drivers, como por ejemplo API-TMC que es una api provista por el fabricante trinamic y adaptada a este firmware. También la API-BOSH fue provista por el fabricante y adaptada a este firmware. Y también por una API específica de este

firmware con contiene lógica de código como por ejemplo el manejo de programas guardados en memoria interna.

La capa tres corresponde a la capa de aplicaciones, el firmware cuenta con 3 aplicaciones fundamentales para el funcionamiento del equipo y una aplicación de test utilizada para probar nuevos componentes y realizar test sobre el sistema que se activa y desactiva según la necesidad de uso. La aplicación app coating contiene toda la lógica de control de movimientos, es la aplicación que controla los movimiento del equipo

Las aplicaciones app consola y app hmi se encargan de la comunicación con el usuario del equipo.

3.2.2. Módulos principales

Módulo coating

Módulo de consola

Módulo hmi

Módulo de calibración

La carpeta /components/config contiene tres archivos de configuración importantes, hardware.h contiene todos las macros referidas a los pines de conexión del modelo de microcontrolador utilizado, os config.h contiene las macros de configuración de las tareas de FreeRTOS tal es el caso de tamaños, prioridades, y periodos de tiempo. Por último machine.h contiene las macros relacionadas con la calibración del equipo. La macro mas importante es MACHINE STEPS PER MILLIMETER y es muy importante que este bien definida, en la sección cuatro(llenar) se demuestra el procedimiento realizado para definir su valor. Esta macro define cuantos micropasos del motor son necesarios para generar un desplazamiento de 1 mm. Con este valor de micropasos por milímetro se pueden calcular los factores de correccion de unidades. Es decir, los registros del driver TMC5130 para posición son expresados en la unidad de micropasos, para la velocidad utiliza micropasos sobre segundos y para la aceleracion micropasos sobre segundos al cuadrado.

Como se analiza en la hoja de datos del driver [15] en el capitulo () para lograr es importante conteplar en el calculo la velocidad de clock externo incorporado.

Como se mencionon en la sección () el equipo de configuro con 51200 micropasos.

```

1
2 #define MACHINE_STEPS_PER_MILLIMETER (12916)
3 #define MACHINE_EXT_CLOCK (16000000) //16MHz
4
5
6 /*FACTOR*/
7 /* ((MACHINE_EXTERNAL_CLOCK/2)*(1/8388608)) */
8 #define MACHINE_USTEPS_VELOCITY_FACTOR (0.9536743164)
9 /* ((MACHINE_EXT_CLOCK*MACHINE_EXT_CLOCK)/(512*256)/(16777216) */
10 #define MACHINE_USTEPS_ACCELERATION_FACTOR (116.4153218)
11
12
13 /*UPPER AND LOWER MECHANICAL LIMIT*/
14

```

```

15 #define MACHINE_CONTROL_MECHANICAL_UPPER_LIMIT      ( 
    MACHINE_STEPS_PER_MILLIMETER * 10 ) // 10mm
16 #define MACHINE_CONTROL_MECHANICAL_LOWER_LIMIT      ( 
    MACHINE_STEPS_PER_MILLIMETER * 290) // 290mm

```

CÓDIGO 3.1. Pseudocódigo del lazo principal de control.

3.3. Estructura mecánica

3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecanizado CNC

Como se mencionó en la sección 2.4 se utilizó para el diseño mecánico del equipo el software BOBCAD. El módulo CAD del software nos permite realizar un modelo 2D y 3D de pieza necesarios para la fabricación. El prototipo de dip coater cuenta actualmente con dos piezas mecanizadas. Podemos observar en la figura 3.8 la pieza que se acopla al carro de la guía lineal presentada en la sección 2.4.

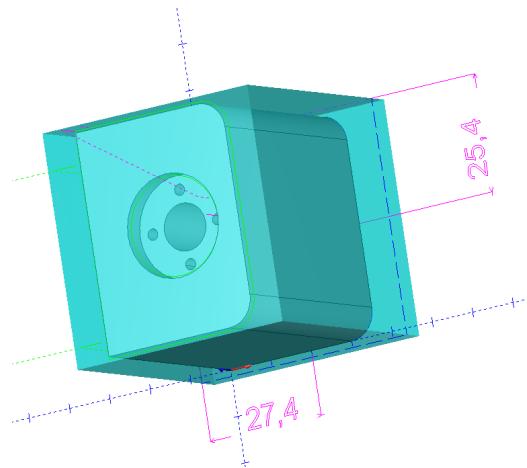


FIGURA 3.8. Pieza personalizada soporte de carro.

Y en la figura 3.9 el soporte superior que sostiene el motor paso a pasos y el tornillo que esta acoplado al eje del motor.

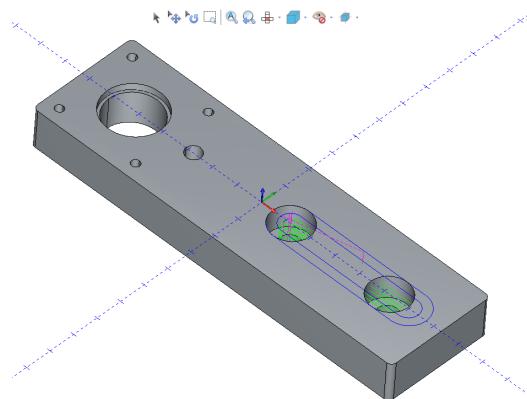


FIGURA 3.9. Pieza personalizada soporte de estructura superior.

Con el modelo 3D diseñado se fabricó una primera versión a través de impresión 3D en plástico, luego que las piezas fueron probadas, testeadas y aprobadas en el prototipo se paso a la fabricación en aluminio.

La estrategia utilizada en el mecanizado es por el método de arranque de virtua, es decir que se parte de un bloque de aluminio con material suficiente y las herramientas de corte van penetrando y desventrando el bloque hasta lograr la pieza. Esta estrategia se programa en la parte CAM del software, se puede observar en la figura 3.10 un listado de todas las operaciones que se van definiendo en la programación.



FIGURA 3.10. Estrategias de mecanizado en software Bodcad.

Existen diferentes funciones para diferentes tipos de operaciones tal es el caso de refrentado, vaciado, fresado de chaflán, taladros y muchas más. Cada una de estas funciones en general son realizadas por herramientas específicas que son definidas en la configuración del software. Estas piezas fueron fabricadas en dos etapas, primero se mecanizo la parte superior de la pieza y luego de una rotación de 180° y otro programa se mecanizo la parte inferior.

3.3.2. Modelos 3D y real

A continuación en la figura 3.11 se presenta el primer modelo 3D diseñado de equipo dip coater.

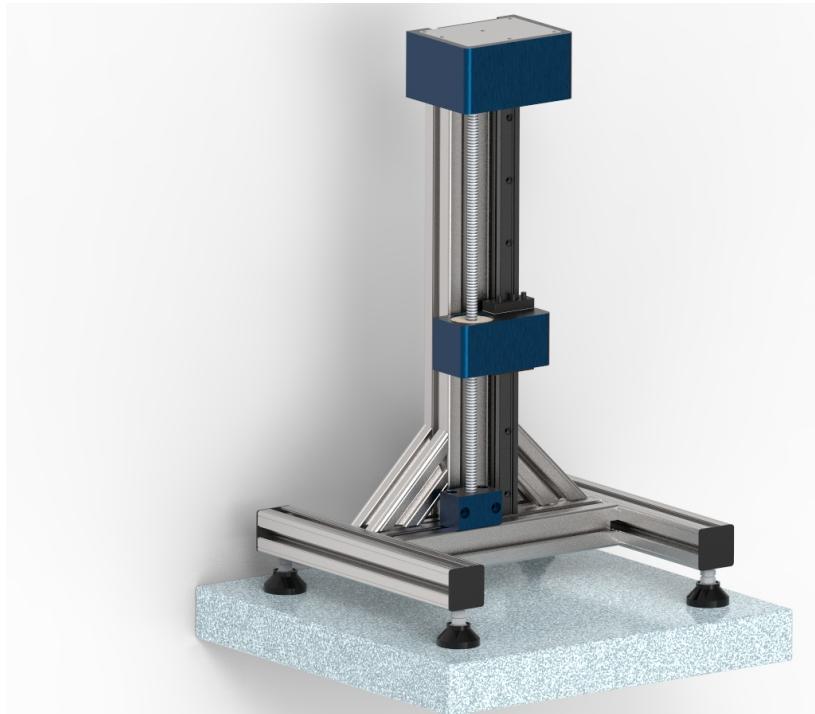


FIGURA 3.11. Modelo 3D.

Se detallan a continuación los siguientes componentes fundamentales del equipo:

- Guiás lineales IGUS
- Mecanizado soporte superior y mecanizado carro
- Placa electrónica
- Pantalla táctil 4.3 inch

Luego de sucesivas iteraciones con pruebas de piezas impresas en material plástico se logró fabricar un primer prototipo completamente en metal que de presenta a continuación en la figura 3.12.



FIGURA 3.12. Primer prototipo dip coater TECSCI.

Capítulo 4

Ensayos y resultados

4.1. Pruebas funcionales de hardware y rediseño

La idea de esta sección es explicar cómo se hicieron los ensayos, qué resultados se obtuvieron y analizarlos.

4.1.1. Comunicación con periféricos

4.1.2. Ensayo de funcionamiento continuo

4.2. Pruebas funcionales firmware y rediseño

4.2.1. Tiempo de ejecución de programas

4.3. Calibración del equipo

4.3.1. Desplazamiento lineal y micropasos

4.4. Pruebas de campo con personal capacitado



FIGURA 4.1. Ensayo de desplazamiento lineal con micrómetro.



FIGURA 4.2. Micrómetro digital Asimeto.

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:

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

Lamentablemente la planificación original no pudo ser sostenida, abarcar íntegramente la fabricación de un MVP fue demasiado trabajo para los tiempos y recursos establecidos. Existieron retrasos en el diseño y la fabricación mecánica en donde el autor no pudo 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.
- En lo inmediato 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.

- Durante el mes de junio del presente año investigadores del INS (Instituto de Nanositemas) llevarán a cabo ensayos para caracterizar el equipo. El ensayo contemplará la generación de cincuenta *films* sobre soluciones químicas de TiO₂ y SiO₂ 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/tecscli/dipcoater>.
- [3] Martin Abel Gambarotta. *Hardware*. Visitado el 15-03-2022. URL: https://github.com/martinch14/tecscli_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/ksvnima/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](https://doi.org/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/>.

- [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>.