

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	19
3.2. Firmware	21
3.2.1. Capas de abstracción	21
3.2.2. Módulos principales de software	22
Control de movimientos	22
Interfaz usuario-máquina	25
Parámetros de calibración	25
3.3. Estructura mecánica	28
3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecanizado CNC	28
3.3.2. Modelos 3D y real	30
4. Ensayos y resultados	33
4.1. Pruebas funcionales de hardware y rediseño	33
4.1.1. Comunicación con periféricos	33
4.1.2. Ensayo de funcionamiento	33
4.2. Pruebas funcionales firmware y rediseño	33
4.2.1. Tiempo de ejecución de movimientos	33
4.3. Calibración del equipo	34
4.3.1. Desplazamiento lineal y micro pasos	34
4.4. Pruebas de campo con personal capacitado	37

5. Conclusiones	39
5.1. Resultados obtenidos	39
5.2. Próximos pasos	39
Bibliografía	41

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.	20
3.6.	Placa fabricada MAYER SRL.	20
3.7.	Capas de abstracción de software.	21
3.8.	Software TMCL-IDE.	23
3.9.	Configuración de funcionalidades stallguard2 y coolstep.	24
3.10.	Configuración de rampa de seis puntos.	24
3.11.	Comandos de movimientos.	26
3.12.	Comandos de control.	26
3.13.	Comandos de lectura sobre el driver TMC5130.	27
3.14.	Comandos de lectura sobre el driver TMC5130.	27
3.15.	Comandos de lectura sobre el driver TMC5130.	27
3.16.	Unidades.	28
3.17.	Pieza personalizada soporte de carro.	29
3.18.	Piezas personalizada soporte de estructura superior.	29
3.19.	Estrategias de mecanizado en software Bodcad.	30
3.20.	Modelo 3D.	31
3.21.	Primer prototipo dip coater TECSCI.	31
4.1.	Comparación de tiempos teóricos y registrados.	34
4.2.	Comparador digital Asimeto.	35
4.3.	Ensayo de desplazamiento lineal.	36

Índice de tablas

1.1. Dip coaters en el mercado	5
2.1. Comparación Stone	12
4.1. Ensayo de tiempo en desplazamientos	34
4.2. Ensayo de desplazamiento	35
4.3. Ensayo de desplazamiento	36

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 mismo 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 se destaca 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], a los archivos de diseño y fabricación del circuito impreso [3] y a los modelos de piezas mecánicas necesarias para replicar, reparar o adaptar el equipo según sus necesidades.

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 de su 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 contrato de incubación le permite contar con un taller mecánico con maquinaria suficiente para la fabricación de prototipos, con la posibilidad de poder escalarlos hacia una etapa de producción. A continuación se mencionan los recursos mas importantes:

- Torno CNC (*Computer Numerical Control*).
- Centro de mecanizado CNC.
- Torno y fresadora manual.

- Láser de corte.
- Cabina de *blasting*

En la siguiente figura 1.1 se observan los equipos mencionados.



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*. Las mismas 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 un equipo dip coater.

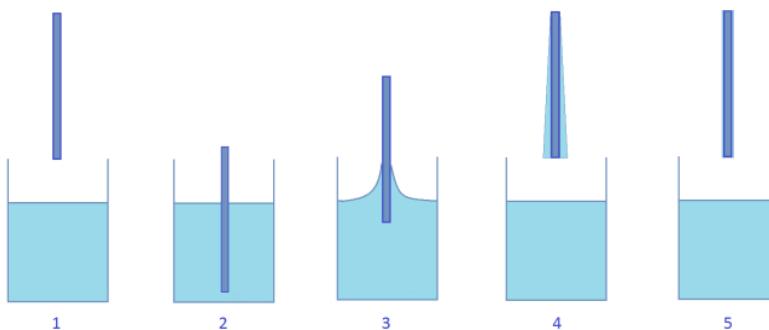


FIGURA 1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo ¹.

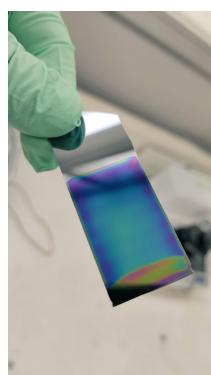
1. La muestra desciende a velocidad controlada.

¹Imagen tomada de [4]

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 estudiarán en el capítulo 3 dos modelos matemáticos que explican este fenómeno y se dará una noción mas detallada de las velocidades que caracterizan al proceso.
4. Se extrae toda la muestra.
5. El usuario puede tener interés en volver a repetir el proceso un tiempo después.

La principal característica del equipo es brindarle 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 se observan 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 de capa logrados en este experimento fueron de entre 180 nm y 200 nm, con velocidades de inmersión y extracción configuradas en 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. Los mismos 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.

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

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



FIGURA 1.4. Equipo de la empresa Kibron.

En la figura 1.5 se observan 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 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 se presenta 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, lo 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.

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

Se pueden extraer entonces 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 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 y 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 las velocidades utilizadas, también se puede observar la relación entre los diferentes modelos aplicados.

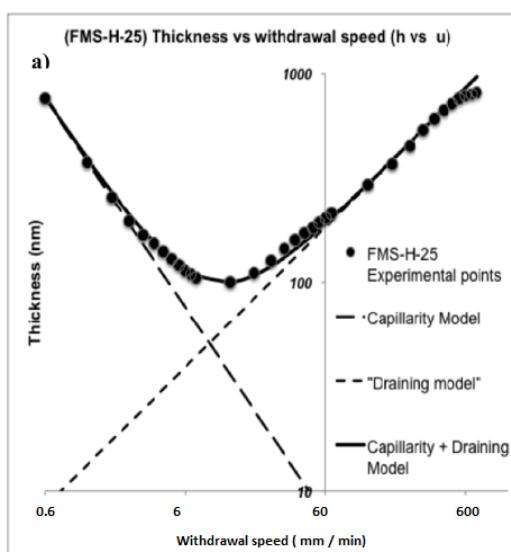


FIGURA 2.1. Espesor vs velocidad ¹.

¹Imagen tomada de [12].

Los resultados del experimento concluyen 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 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.

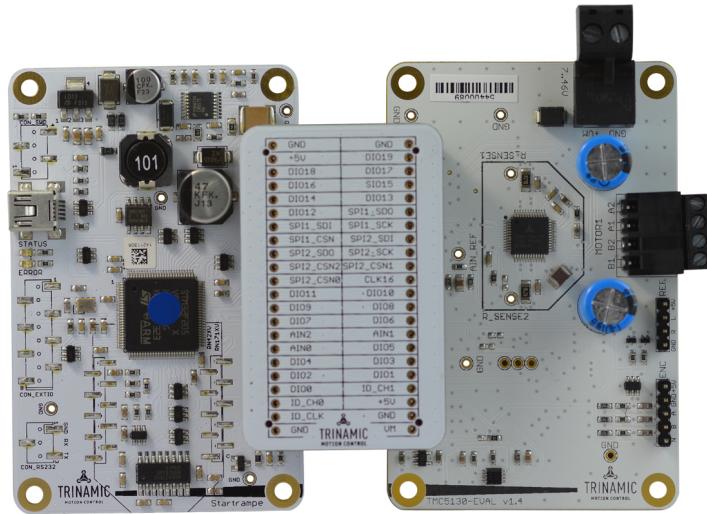


FIGURA 2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130².

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.

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

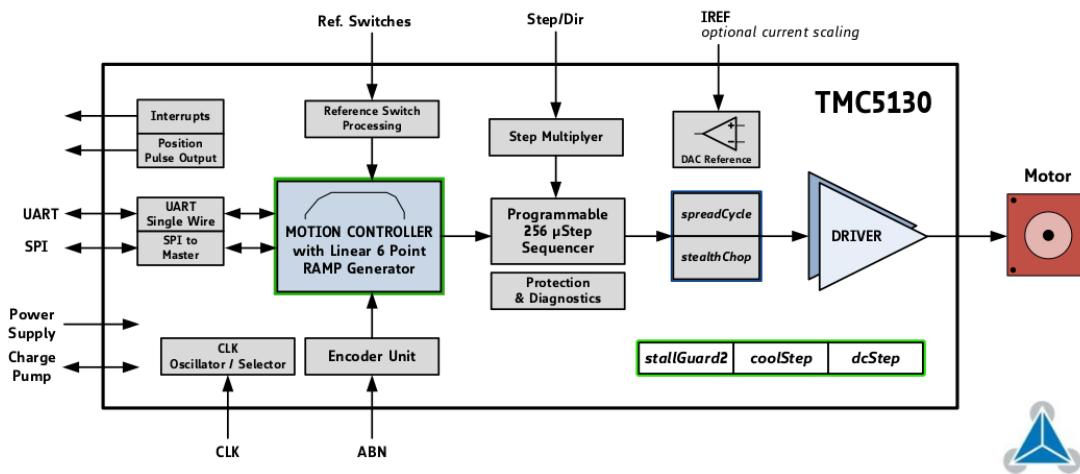
La comunicación con el CI se puede establecer a través del protocolo *UART* (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) o *SPI* (*Serial Peripheral Interface*), para el desarrollo de este trabajo se utilizó el protocolo de comunicación SPI.

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 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

²Imagen tomada de [10].

³Imagen tomada de [10].

FIGURA 2.3. Diagrama en bloques TMC5130³.

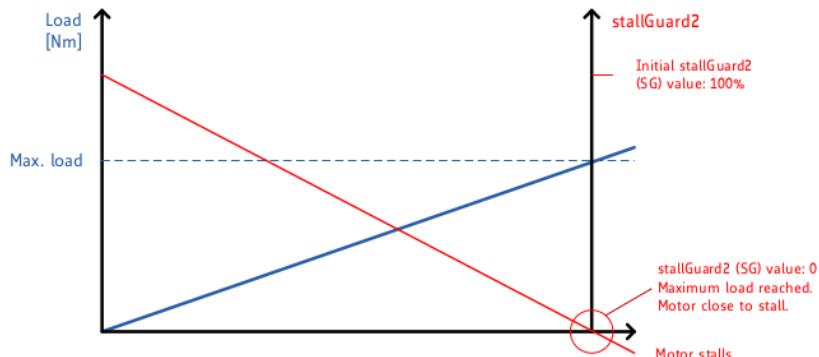
de 256 micropasos por cada paso del motor. Siguiendo con el ejemplo recién presentado, para un motor de paso 1.8° se tendrían en total 51200 micropasos como se observa en la ecuación 2.1.

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

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.

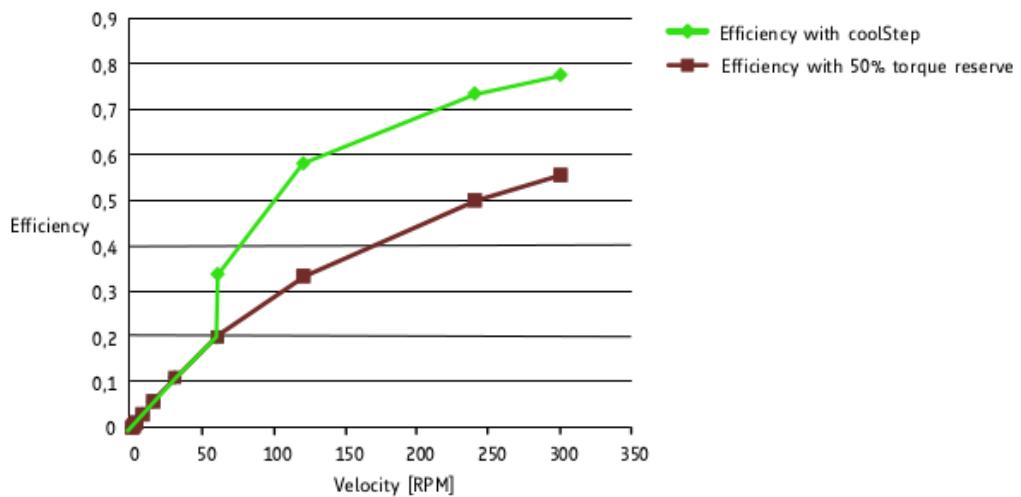


FIGURA 2.5. Función coolstep.⁵

Por último se utilizará la función *dcStep*, que es un modo de commutación automática 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. El acceso a los registros se realizará a través del protocolo SPI. 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:

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*). Las mismas incorporan 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 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, 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 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 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 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 [19], 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 [20] 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 (*Computer Numerical Control*) de la marca FAGOR [21] utilizada para la fabricación de las piezas del

⁶Imagen tomada de [19].

equipo dip 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.

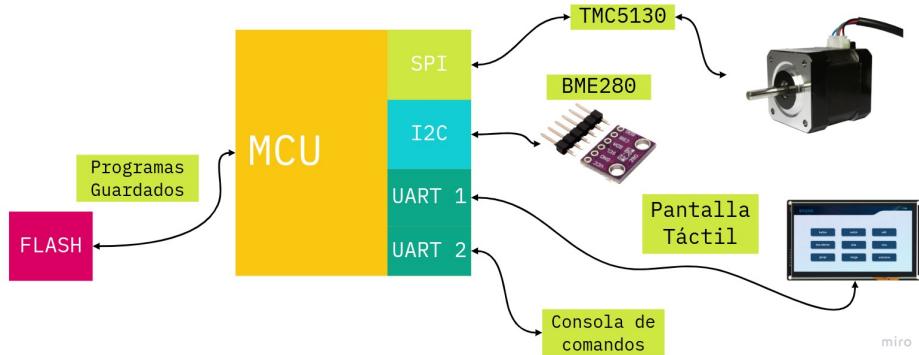


FIGURA 2.8. Esquema de equipo propuesto.

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. 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 presenta el diseño y la implementación de las tres partes fundamentales del equipo. Se abarcan aspectos de diseño de hardware, desarrollo de 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], la elección del mismo se basó en que sus últimas versiones presentaron mejoras significativas respecto a sus predecesoras.

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

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

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.

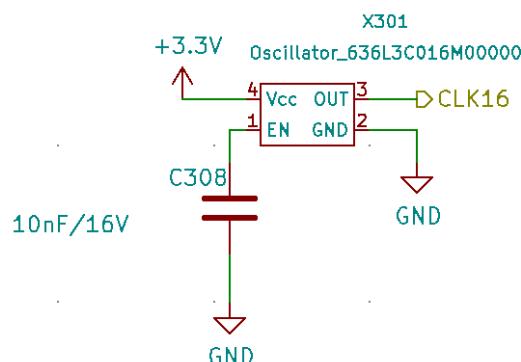
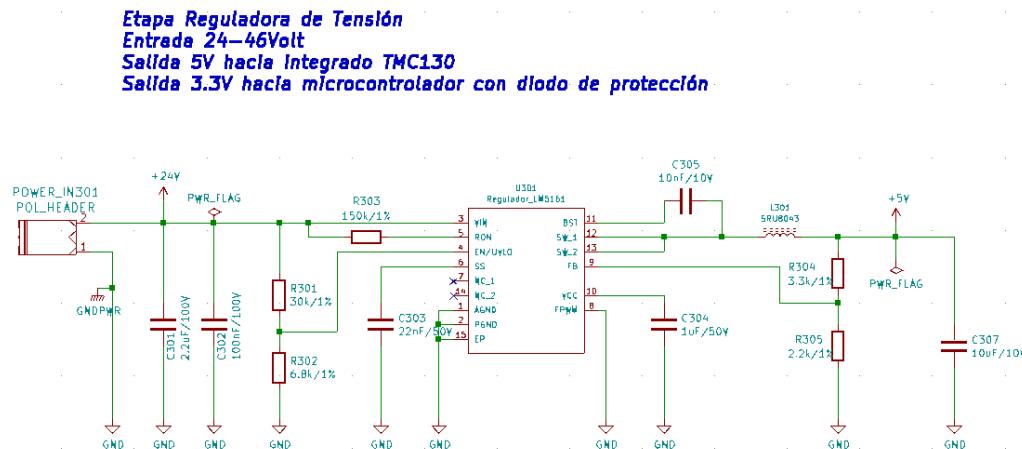


FIGURA 3.1. Clock para el CI TMC5130.

Otra etapa importante, como se observa en la figura 3.2, es el regulador de tensión que permite alimentar al equipo con tensiones continuas de entre 24 V y 46 V. Para dicho fin se utilizó el CI LM5161 en su configuración *step-down buck converter*. El equipo fue diseñado para ser alimentado con una fuente externa de tensión continua, simplificando así cuestiones regulatorias de certificación que deben cumplir equipos que se alimentan directamente a la red eléctrica.



El módulo NodeMCU es una placa de desarrollo que contiene el SoC ESP32-WROOM. A partir del estudio de su diseño, se implementó la etapa conversora SERIAL-USB que puede observarse en la figura 3.4. El mismo 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 evita tener que contar con un programador externo para comunicarse con el equipo.

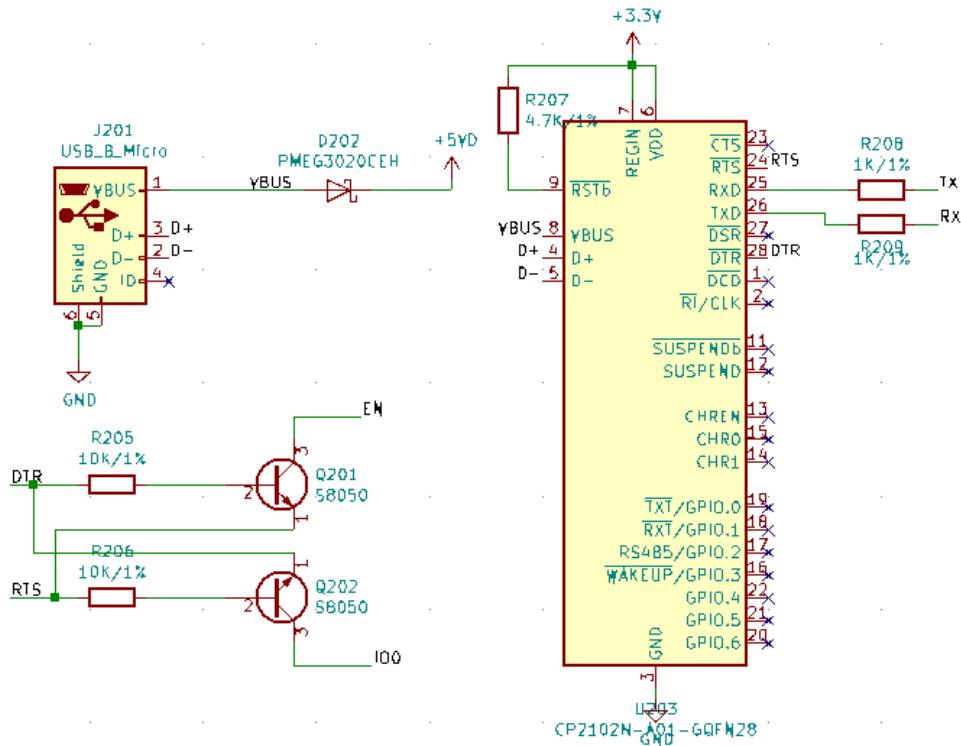


FIGURA 3.4. Conversor UART-USB.

Finalmente, se observa en la figura 3.5 el diseño 3D generado por el software KICAD. El mismo se encuentra disponible en los repositorios de la empresa TECSCI [3]. La placa electrónica de este equipo dip coater cuenta con licencia CERN OHL v.1.2 [25].

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 se describen algunas restricciones de diseños impuestas por el fabricante:

- Grilla de posicionamiento principal: 0.25 mm
- Grilla de ruteo principal: 0.25 mm
- Agujeros de montaje: 3.2 mm
- Pistas principales: 0.5 mm
- Pistas inferiores: 0.25 mm (límite particular 8 mils(0.20mm))
- Pistas superiores: 0.8 mm

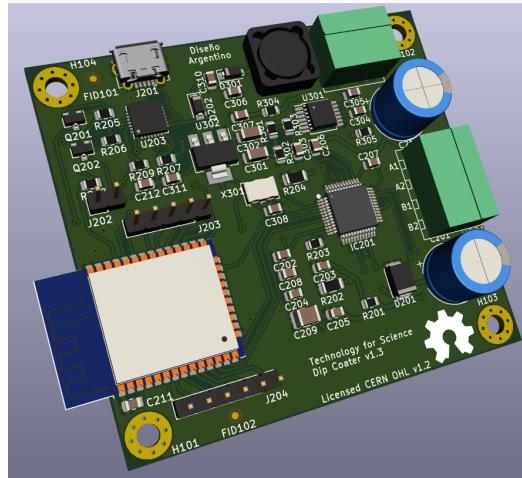


FIGURA 3.5. Modelo 3D Kicad.

- Vías: 0.8 mm /0.4 mm (límite particular 8 mils(0.20mm))
- Margen general: 0.22 mm
- Margen particular: 0.2 mm (límite particular 8 mils(0.20 mm))
- Fabricación: espesor 1.6mm FR4
- Restricciones generales del fabricante: estándar 10 mils(0.254 mm)

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 trabajó con el *framework* ESP-IDF [28] 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 desarrolló un firmware modular que atomiza el funcionamiento en diferentes bloques de software, lo cual permite incorporar código de manera incremental y ordenada. Se observan en la figura 3.7 las capas de abstracción de software implementadas.

La idea principal de esta modularización es la de no permitir llamados a funciones entre capas discontinuas. Los módulos de la capa superior o capa APP solo pueden hacer llamados a funciones de la capa intermedia o capa API (*Application Programming Interfaces*) y estos últimos solo pueden llamar a funciones de la capa inferior o capa BOARD.

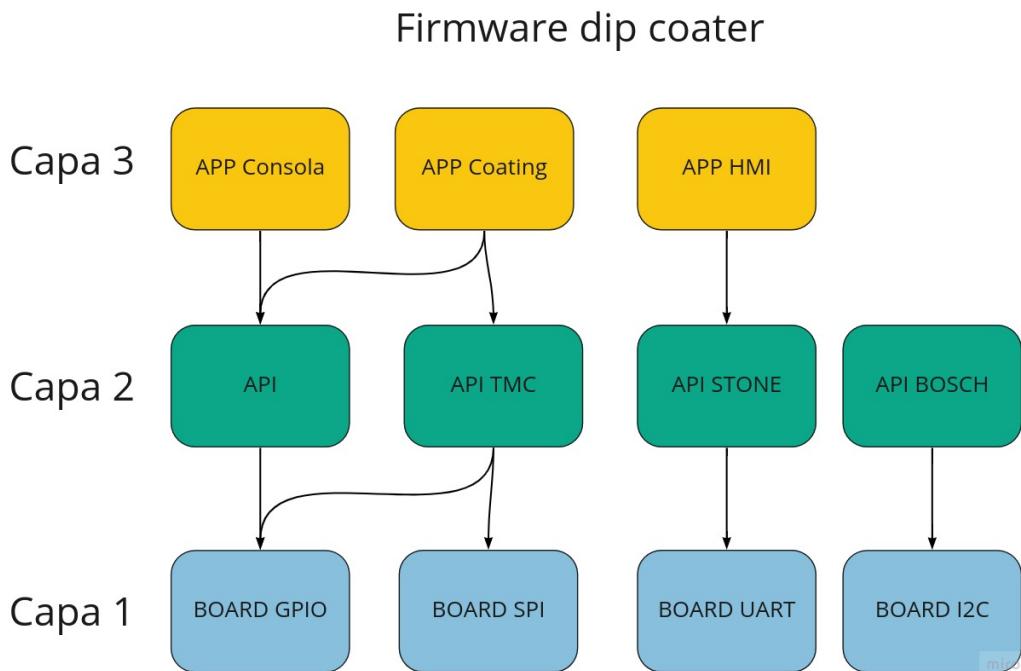


FIGURA 3.7. Capas de abstracción de software.

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 testing utilizada para probar nuevos componentes de software. Cada aplicación contiene al menos una *task* del sistema operativo freeRTOS.

- APP coating: se encarga de la comunicación con el driver TMC5130 y de la ejecución de todos los movimientos.
- APP consola: administra una consola de comandos que permite ejecutar y configurar el equipo a través de una comunicación serial, recibe comandos en la consola serial y los envía a través de una cola de freeRTOS a la app coating para ser procesados.

- APP hmi: administra la interfaz de configuración, establece una comunicación serial con la pantalla táctil, recibe comandos a través de una cola de freeRTOS y los envía a la app coating para ser procesados.
- APP test: se utiliza para probar nuevos componentes y realizar tests sobre el sistema. Se activa y desactiva según la necesidad de uso.

La capa dos esta compuesta por bloques de código provistos por los fabricantes de drivers.

- API TMC: provista por el fabricante Trinamic y adaptada para ser ejecutada bajo el framework ESP-IDF.
- API BOSH: provista por el fabricante y adaptada a este firmware.
- API TECSCI: contiene los módulos de software para el manejo de la capa BOARD, es un módulo que está en constante crecimiento con los diferentes desarrollos que la compañía TECSCI va ejecutando.

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, llamados a periféricos como por ejemplo: UART, GPIO, SPI, I2C entre otros, son realizados desde esta capa. 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.

Cabe aclarar que este diseño de software es un concepto que se fue implementando a través de las sucesivas refactorizaciones del firmware actual y es posible entonces encontrar algunas excepciones de diseño. Las mismas se irán corrigiendo en futuras actualizaciones.

3.2.2. Módulos principales de software

Control de movimientos

La aplicación app coating contiene toda la lógica de control de movimientos, la misma se encarga de realizar toda la configuración inicial del driver TMC5130, de ejecutar los procesos completos de dip coating y de procesar comandos individuales para generar diferentes tipos de movimientos.

Como se mencionó en la subsección 2.2.1 la configuración inicial del driver es compleja, por tal motivo se utilizo el software TMCL-IDE provisto por el fabricante para realizar una configuración interactiva de todos los registros internos del driver. Cabe destacar que con este software se pueden configurar todos los driver que la compañía ofrece, abarcando desde motores paso a paso hasta servomotores, motores *brushless* y de corriente continua.

En esta etapa de configuración es recomendable que el motor este acoplado al eje lineal, junto con el tornillo, la tuerca y el carro ya que el driver registra la corriente que circula por las bobinas del motor y calcula la fuerza contraelectromotriz que el eje esta ejerciendo. En la siguiente figura 3.8 se observa el entorno de desarrollo TMCL-IDE.

A continuación en la figura 3.9 se puede observar el *wizard* de configuración de las funciones *stallguard2* y *coolstep*. Como se mencionó en el capítulo 2 es posible

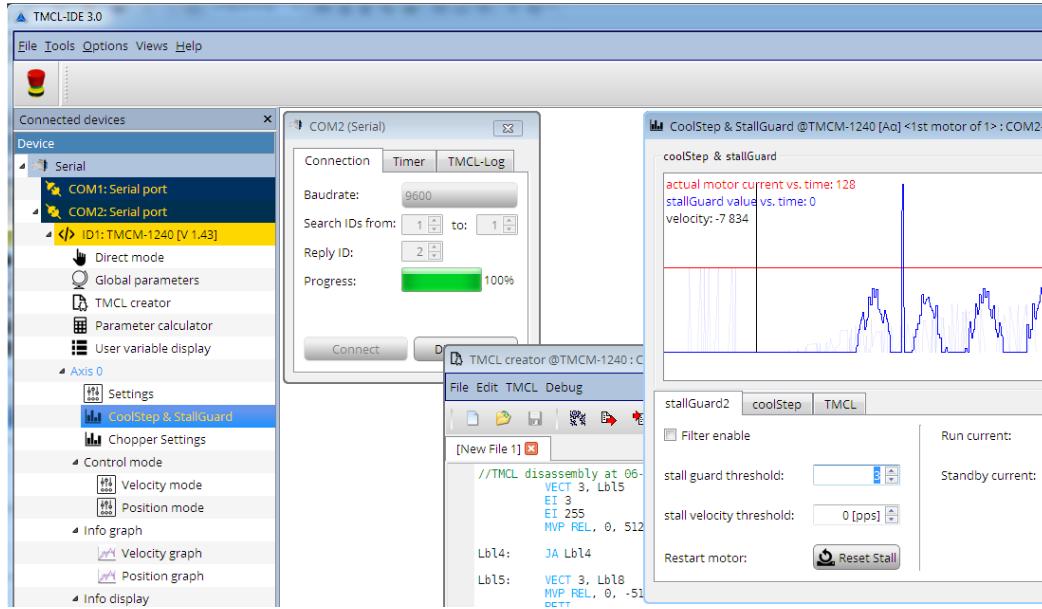


FIGURA 3.8. Software TMCL-IDE.

usar stallguard2 para detectar un límite mecánico de recorrido o final de carreta, el parámetro *stall guard threshold* relaciona la fuerza contraelectromotriz que el driver registra, a medida que mayor fuerza es detectada, es decir mayor corriente en los motores, el valor de stallguard2 disminuye. Se debe entonces configurar un valor de detección para que el driver pueda generar un aviso. El firmware cuenta con una función llamada *mod-coating-process-cero-machine* que se encarga de detectar la señal que el driver envía cuando se detecta un final de carrera. La misma se encarga de parar el motor, generar un desplazamiento en sentido contrario y establecer la nueva posición.

Otros parámetros importantes a configurar son los que definen la rampa de aceleración del desplazamiento. Como se observa en la figura 3.10 es posible definir dos aceleraciones y dos desaceleraciones hasta llegar a una velocidad deseada.

Todos los movimientos del equipo dip coater están definidos de la siguiente manera.

```

1 // Velocidad
2 //V1
3 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_V1, (arg->velocity) / 2);
4 //VMAX
5 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_VMAX, arg->velocity);
6 //VSTART
7 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_VSTART, 0);
8 //VSTOP
9 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_VSTOP, 100);

10 // Seteo Aceleracion
11 //A1
12 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_A1, arg->acceleration);
13 //AMAX
14 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_AMAX, arg->acceleration);

15 // Seteo Desaceleracion
16 //D1
17 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_D1, arg->deceleration);
18 //DMAX
19 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_DMAX, arg->deceleration);

```

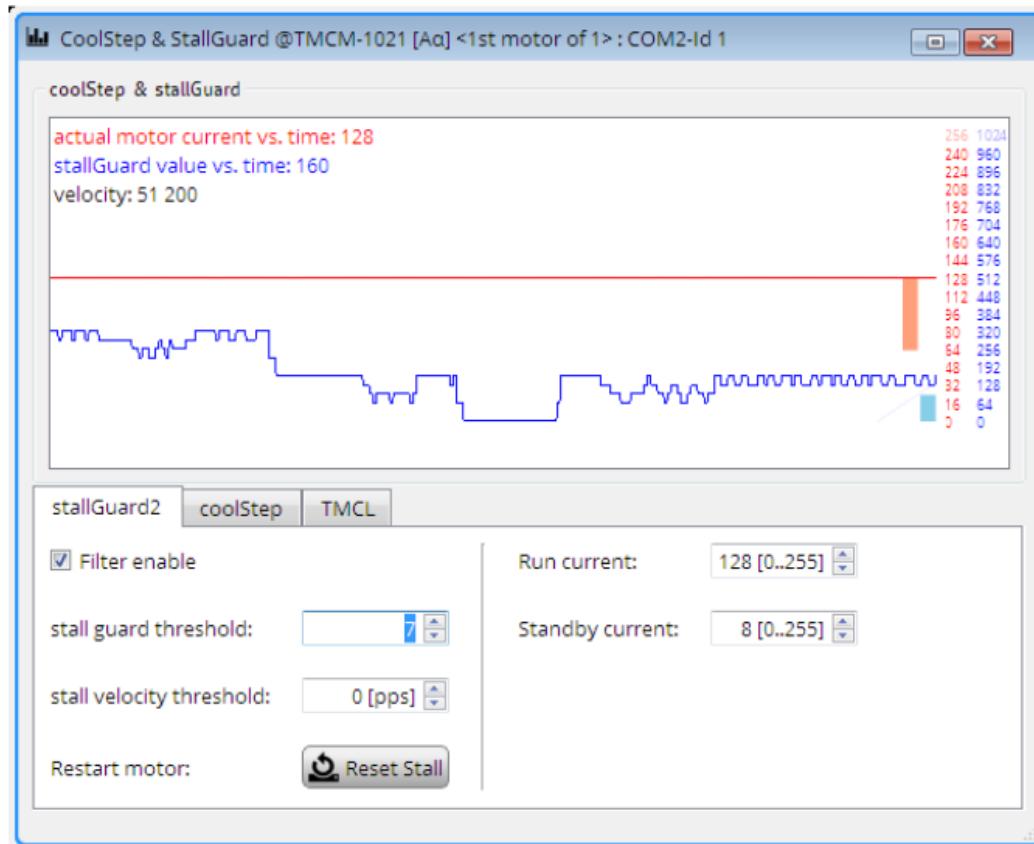


FIGURA 3.9. Configuración de funcionalidades stallguard2 y coolstep.

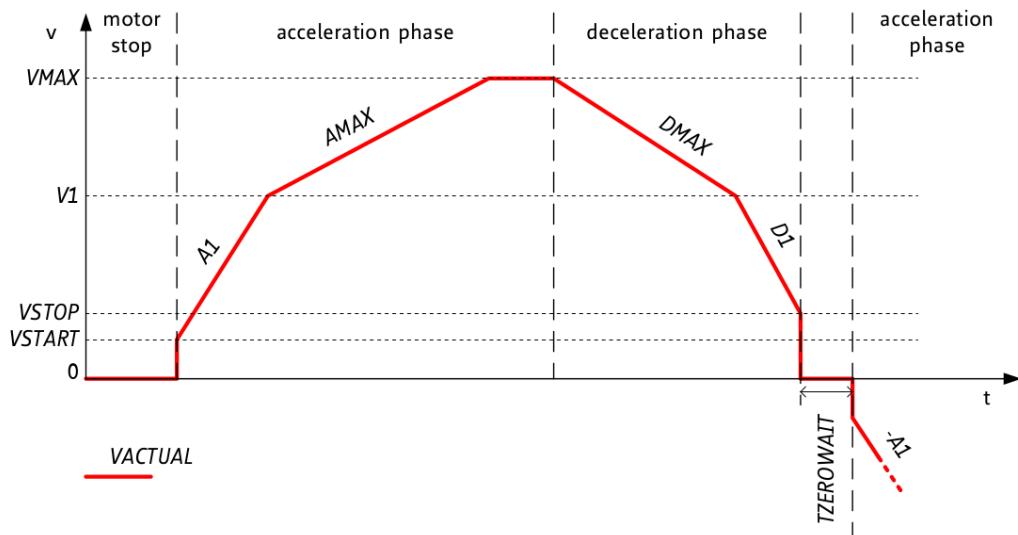


FIGURA 3.10. Configuración de rampa de seis puntos.

```

20 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_DMAX, arg->acceleration);
21 //D1
22 Evalboards.ch1.writeRegister(0, TMC5130_D1, arg->acceleration);

```

CÓDIGO 3.1. Macros para configurar de desplazamientos.

Es decir que se genera una rampa de cuatro puntos al establecer las siguientes relaciones de variables:

- A1 = AMAX (Aceleración establecida por usuario).
- D1 = DMAX (Desaceleración establecida por usuario).
- VMAX (Velocidad establecida por usuario).
- V1 = VMAX / 2 (Velocidad fija del movimiento).

App coating puede recibir a través de implementaciones de colas de FreeRTOS comandos de ejecución desde la app hmi y desde app consola.

Interfaz usuario-máquina

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

App consola permite establecer un canal de comunicación entre el equipo dip coater y un ordenador a través de una comunicación UART. Como se mencionó en la subsección 3.1.1 la placa electrónica incorpora un conversor UART-USB que permite conectar los equipos directamente a través de un cable USB. Se observan a continuación los comandos definidos en la consola para poder interactuar con el equipo.

Y por último como se observa en la figura 3.12 comandos que sirven para leer o escribir registros del driver y para consultar información del sistema.

Como ejemplo se observa a continuación en la figura 3.13 una consulta al registro XACTUAL (0x21) que contiene la posición expresada en micro pasos desde la referencia inicial donde esta posicionado el carro , y luego una consulta al registro XTARGET (0x2D), que en este caso como el carro se encuentra detenido coinciden en valor. XTARGET es uno de los registros que debe modificarse cuando se desea realizar un movimiento. El valor hace referencia a la posición objetivo que se deseé llegar establecida en micro pasos.

Cada vez que el usuario acciona un comando de movimiento o de control del proceso dip coating se envía la orden a través de una cola de FreeRTOS hacia la app coating que se encarga de procesar y ejecutar dicho comando.

Si la maquina esta ejecutando un movimiento individual o un proceso dip coating completo y se le envía un comando, el mismo por seguridad y para evitar que se enculen los movimientos es descartado . En la figura 3.14 se observa que luego de iniciado el proceso dip coating se envia el comando DOWN y el mismo es descartado sin afectar el proceso.

El único comando de movimiento que no es descartado es el comando STOP, por seguridad este es el único comando con tratamiento especial y en cualquier caso siempre se garantiza la ejecución.

Pantalla Json comandos maquina de estados

Parámetros de calibración

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

```

setcommandcustomapp [--dv=<n>] [--da=<n>] [--dw=<n>] [--uv=<n>] [--ua=<n>] [--uw=<n>] [--ln=<n>]
  Dip Coating Set Program Custom
    --dv=<n> Down Velocity
    --da=<n> Down Acceleration
    --dw=<n> Down Wait ,ms
    --uv=<n> Up Velocity
    --ua=<n> Up Acceleration
    --uw=<n> Up Wait, ms
    --ln=<n> Total Loop

cerosample
  Dip Coating Program Set Cero of sample

depthsample [-d <n>]
  Dip Coating Program Set Delta Depth Sample
    -d <n> Delta Depth Sample [mm]

ceromachine
  Dip Coating Set Cero Machine

run
  Dip Coating Start

downfast
  Dip Coating Down Fast

down
  Dip Coating Down

downslow
  Dip Coating Down Fast

upfast
  Dip Coating Up Fast

up
  Dip Coating Up

upslow
  Dip Coating Up Slow

stop
  Dip Coating Emergency Stop

```

FIGURA 3.11. Comandos de movimientos.

```

data
  Dip Coating Read all data saved

ena
  Dip Coating General Enable Driver TMC5130

dis
  Dip Coating General Disable Driver TMC5130

reset
  Dip Coating Reset

timestamp
  Dip Coating System Time

read_register_tmc [-a <n>]
  Read TMC Register
    -a, --address to write=<n> Write TMC Register [HEX]
    -v, --value=<n> Write TMC Register [HEX]

write_register_tmc [-a <n>] [-v <n>]
  Write TMC Register
    -a, --address to write=<n> Write TMC Register [HEX]
    -v, --value=<n> Write TMC Register [HEX]

```

FIGURA 3.12. Comandos de control.

```
tecscl_dipcoater> read_register_tmc -a 0x21
I (1572337) mod_console_commands: Address->0x21 Value->0x00108e95
tecscl_dipcoater> read_register_tmc -a 0x2D
I (1580067) mod_console_commands: Address->0x2d Value->0x00108e95
tecscl_dipcoater> █
```

FIGURA 3.13. Comandos de lectura sobre el driver TMC5130.

```
I (1179177) app_hmi: state_window_running_program_
I (1179277) mod_coating_process : Proceso Iniciado - Motor Encendido
I (1179277) mod_coating_handlers: HandlerDownUntil
I (1179277) mod_coating_handlers: Vel:212000
I (1179287) mod_coating_handlers: Accel:65000
I (1179287) mod_coating_handlers: Desplazamiento hasta fluido en pasos:1549920

tecscl_dipcoater> down
E (1181577) mod_console_commands: Comando DOWN descartado, maquina trabajando
Command returned non-zero error code: 0x1 (ERROR)
tecscl_dipcoater> I (1185727) mod_coating_handlers: HandlerWait
I (1187727) mod_coating_handlers: HandlerDownLoop
I (1187727) mod_coating_handlers: Vel:226120
I (1187727) mod_coating_handlers: Accel:308187
I (1188977) mod_coating_handlers: HandlerWaitDown
I (1189977) mod_coating_handlers: HandlerUpLoop
I (1189977) mod_coating_handlers: Vel:226120
I (1189977) mod_coating_handlers: Accel:308187
I (1191227) mod_coating_handlers: HandlerWaitUp
I (1192227) mod_coating_handlers: HandlerFinish
█
```

FIGURA 3.14. Comandos de lectura sobre el driver TMC5130.

```
I (1250627) mod_coating_process : Proceso Iniciado - Motor Encendido
I (1250627) mod_coating_handlers: HandlerDownUntil
I (1250627) mod_coating_handlers: Vel:212000
I (1250637) mod_coating_handlers: Accel:65000
I (1250637) mod_coating_handlers: Desplazamiento hasta fluido en pasos:129160

tecscl_dipcoater> stop
I (1252957) mod_console_commands: Comando STOP recibido
tecscl_dipcoater> █
```

FIGURA 3.15. Comandos de lectura sobre el driver TMC5130.

- hardware.h
- os-config.h
- machine.h

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 más importante es MACHINE STEPS PER MILLIMETER y es necesario que este bien definida, en la sección 4.3 se demuestra el procedimiento realizado para definir su valor. Esta macro define cuantos micro pasos de motor son necesarios para generar un desplazamiento de 1 mm. Con este valor de micro pasos por milímetro se pueden calcular los factores de corrección de unidades. Es

decir, los registros del driver TMC5130 para posición son expresados en unidades de micro pasos, para la velocidad utiliza micro pasos sobre segundos y para la aceleración micro pasos sobre segundos al cuadrado.

Se analiza de la hoja de datos del driver [15] como se observa en la figura 3.16 el cálculo que se debe realizar cuando se cuenta con un clock externo incorporado.

PARAMETER VS. UNITS		
Parameter / Symbol	Unit	calculation / description / comment
f _{CLK} [Hz]	[Hz]	clock frequency of the TMC5130A in [Hz]
s	[s]	second
US	μstep	
FS	fullstep	
μstep velocity v[Hz]	μsteps / s	v[Hz] = v[5130A] * (f _{CLK} [Hz]/2 / 2 ²³)
μstep acceleration a[Hz/s]	μsteps / s ²	a[Hz/s] = a[5130A] * f _{CLK} [Hz] ² / (512*256) / 2 ²⁴

FIGURA 3.16. Unidades.

Como se mencionó en la subsección 2.2.1 el equipo se configuró con 51200 micro pasos.

```

1
2 #define MACHINE_STEPS_PER_MILLIMETER (12916)
3 #define MACHINE_EXT_CLOCK (16000000) //16MHz
4
5
6 /*FACTOR*/
7 /* ((MACHINE_EXT_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 (
16     MACHINE_STEPS_PER_MILLIMETER * 10 ) // 10mm
16 #define MACHINE_CONTROL_MECHANICAL_LOWER_LIMIT (
17     MACHINE_STEPS_PER_MILLIMETER * 290) // 290mm

```

CÓDIGO 3.2. Macros para configurar de desplazamientos.

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 permite realizar modelos 2D y 3D de pieza necesarios para la fabricación. El prototipo dip coater cuenta actualmente con dos piezas mecanizadas en aluminio.

Se observa en la figura 3.17 la pieza que se acopla al carro de la guía lineal presentada en la sección 2.4.

Y en la figura 3.18 el soporte superior que sostiene el motor paso a paso y el tornillo que esta acoplado al eje del motor.

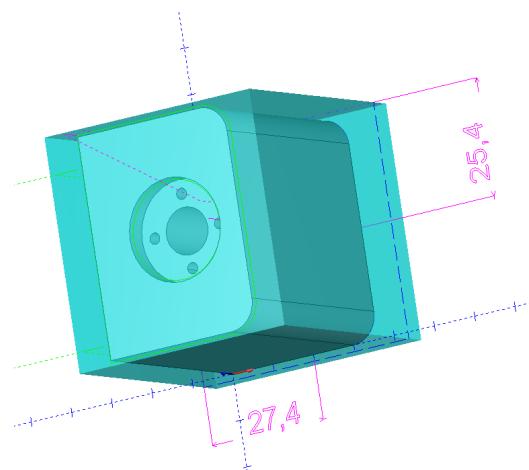


FIGURA 3.17. Pieza personalizada soporte de carro.

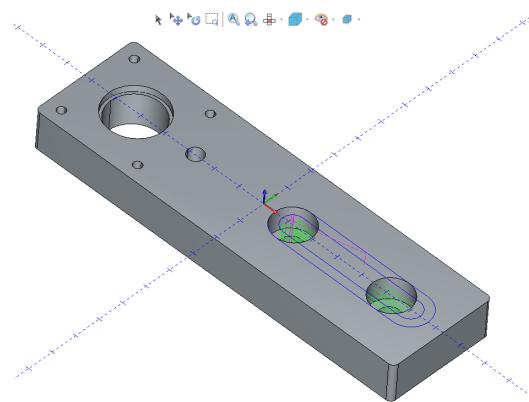


FIGURA 3.18. Piezas personalizada soporte de estructura superior.

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 viruta, es decir que se parte de un bloque de aluminio con volumen de material suficiente y se desbasta con herramientas de corte hasta modelar la pieza. Esta estrategia se programa en la parte CAM del software, se puede observar en la figura 3.19 un listado de las operaciones realizadas para la fabricación de la pieza.

Existen diferentes estrategias de mecanizado para diferentes tipos de operaciones tal es el caso de refrentado, vaciado, fresado de chaflán, taladro, roscado entre otras. Cada una de estas funciones en general se realizan con herramientas específicas que son definidas en la configuración del software. Estas piezas se fabricaron en dos etapas, primero se mecanizó la parte superior de las mismas y luego de una rotación de 180 ° se terminó de mecanizar la parte inferior.

El material mecanizado fue aluminio 6061, el mismo es una aleación endurecida compuesta por aluminio, magnesio y silicio, la elección se basó en que puede someterse a un posterior tratamiento de anodizado. El anodizado es un tratamiento electrolítico, que genera una capa superficial de óxido de aluminio (alúmina), de espesor superior al que el aluminio adquiere naturalmente y tiene como ventajas



FIGURA 3.19. Estrategias de mecanizado en software Bodcad.

la protección contra atmósferas agresivas, agentes químicos y produce una mayor dureza superficial. Poder anodizar las piezas es fundamental debido a que el equipo trabaja con sustancias muy corrosivas.

3.3.2. Modelos 3D y real

A continuación en la figura 3.20 se presenta el primer modelo 3D diseñado de equipo dip coater.

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



FIGURA 3.20. Modelo 3D.

Luego de sucesivas iteraciones con pruebas de piezas impresas en material plástico se logró fabricar un primer prototipo completamente en metal que se presenta a continuación en la figura 3.21.



FIGURA 3.21. Primer prototipo dip coater TECSCI.

Capítulo 4

Ensayos y resultados

4.1. Pruebas funcionales de hardware y rediseño

En el presente capítulo se explican los ensayos realizados sobre el prototipo de equipo dip coater, se presentan y analizan los resultados obtenidos y se analizan futuros cambios.

4.1.1. Comunicación con periféricos

4.1.2. Ensayo de funcionamiento

4.2. Pruebas funcionales firmware y rediseño

4.2.1. Tiempo de ejecución de movimientos

El ensayo se realizó para verificar los parámetros que definen el desplazamiento de la muestra, es decir para verificar que las velocidades y aceleraciones que definen movimientos sean similares a las que surgen del cálculo teórico. En el capítulo 3 se detalló la configuración de la rampa de seis puntos que define un movimiento y se mostró como se configuraron los parámetros para obtener una rampa de cuatro puntos en donde la rampa de aceleración es igual a la rampa de desaceleración.

Dicha rampa está definida por la siguiente ecuación 4.1.

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

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

Para realizar el ensayo se preparó un bloque de código que funcionó de la siguiente manera:

1. Se configura un movimiento descendente con los parámetros ya mencionados.
2. Se ejecuta el movimiento, al iniciar se registra el tiempo del sistema.

TABLA 4.1. Ensayo de tiempos en desplazamiento

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

3. Al terminar el movimiento, se registra el tiempo del sistema, se calcula el tiempo que llevo dicho movimiento, se envía por terminal UART un bloque con toda la información.
4. Se pasa al siguiente parámetro y se repite el ciclo.
5. En el ordenador donde esta conectado el equipo se ejecuta un script de Python que almacena todos los datos en un archivo.

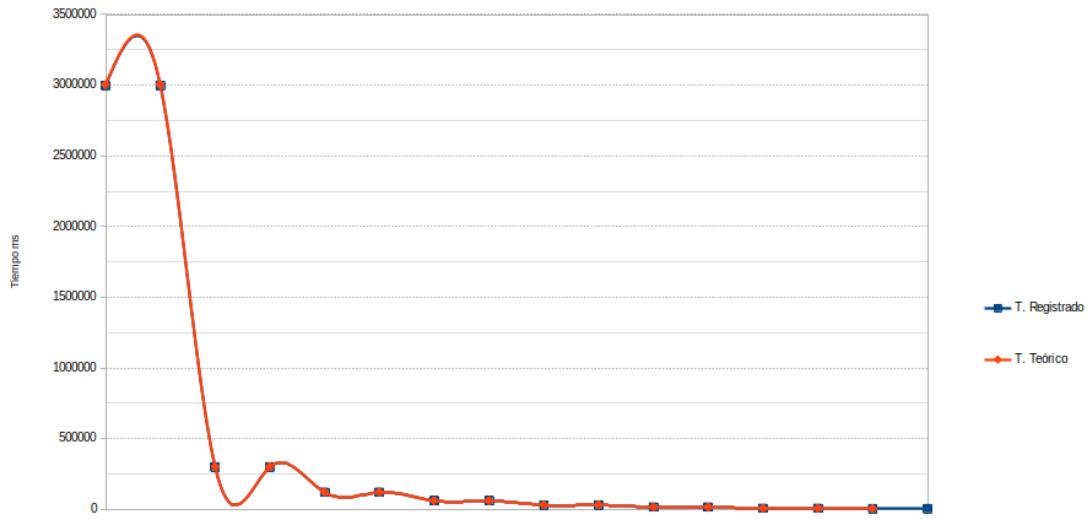


FIGURA 4.1. Comparación de tiempos teóricos y registrados.

4.3. Calibración del equipo

4.3.1. Desplazamiento lineal y micro pasos

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

Para realizar las mediciones se utilizó un comparador digital de la marca Asimeto[29] el cual puede observarse en la figura 4.2, el mismo tiene una resolución de 0.0001 mm y permite desplazamientos de 0 a 50 mm.



FIGURA 4.2. 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 muy 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 4.3 se observa el banco de medición donde se visualiza el comparador Asimeto apoyado sobre una base metálica independiente al equipo dip coater con la punta del mismo en contacto directo con el carro de desplazamiento.

Para iniciar el ensayo se presiona el botón *origin* en el comparador para poner en cero la medida, la sensibilidad del mismo es tan grande que es difícil dejar la medida inicial en 0,000 mm debido a la acción de apretar el botón. Luego se realizan movimientos descendentes de 1 mm y se registran en la siguiente tabla ??.

TABLA 4.2. Ensayo de desplazamiento lineal descendentes

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

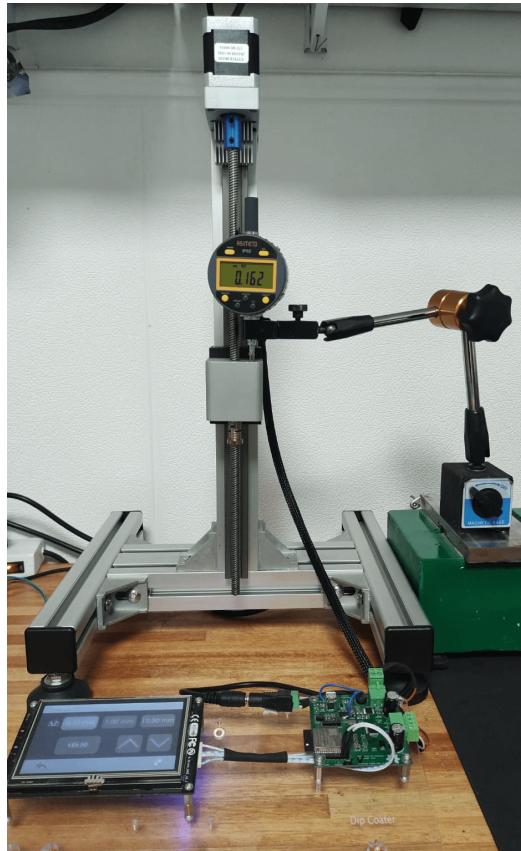


FIGURA 4.3. Ensayo de desplazamiento lineal.

De igual manera para movimientos ascendentes se registran en la siguiente tabla 4.3.

TABLA 4.3. Ensayo de desplazamiento lineal ascendentes

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

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

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

Inicialmente al comenzar el ensayo la macro *MACHINE STEPS PER MILLIMETER* estaba definida con un valor de 12737 micro pasos, luego de esta corrección

la macro quedo definida en 12932 micro pasos. Este ensayo se repitió cinco veces hasta llegar a los valores presentados en las tablas anteriores, en donde se observo que el porcentaje promedio de los errores relativos ascendentes y descendentes garantizaban que el error era en la centésimas de milímetros y no en las décimas de milímetros.

4.4. Pruebas de campo con personal capacitado

Capítulo 5

Conclusiones

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

5.1. Resultados obtenidos

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

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

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

5.2. Próximos pasos

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

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

- Durante el mes de agosto del presente año, investigadores del INS (Instituto de Nanositemas) llevarán a cabo ensayos para caracterizar el equipo. El ensayo contemplará la generación de cincuenta *thin 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>.
- [29] Asimeto. Visitado el 10-07-2022. URL: <https://www.asimeto.com/product-IP65-Digital-Indicators-Series-407.html>.