



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.*



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 (FASTA)
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.*

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. Movimientos controlados	7
2.1.1. Estudio preliminar	7
2.1.2. Circuitos Integrados Trinamic	8
2.1.3. Driver TMC5130	9
2.2. Interfaz de usuario	11
2.3. Estructura mecánica	12
2.4. Equipo propuesto	13
3. Diseño e Implementación	15
3.1. Hardware	15
3.1.1. Diseño y fabricación	16
3.2. Firmware	16
3.2.1. Capas de abstracción	16
3.2.2. Framework de trabajo	16
3.2.3. Módulos principales	16
3.3. Estructura mecánica	16
3.3.1. Modelos 3D	16
3.3.2. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecanizado CNC	16
4. Ensayos y resultados	17
4.1. Pruebas funcionales de hardware y rediseño	17
4.1.1. Comunicación con periféricos	17
4.1.2. Ensayo de funcionamiento continuo	17
4.2. Pruebas funcionales firmware y rediseño	17
4.2.1. Tiempo de ejecución de programas	17
4.3. Calibración mecánica del equipo	17
4.4. Pruebas de campo con personal capacitado	17
5. Conclusiones	19
5.1. Resultados obtenidos	19
5.2. Próximos pasos	19

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. El contexto Tecsci	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. Equipo propuesto	7
2.1.1. Elección de las tecnologías	7
2.2. Movimientos controlados	8
2.2.1. Integrados Trinamic	8
2.2.2. Driver TMC5130	8
2.3. Interfaz de usuario	8
2.3.1. Pantalla Stone	8
2.4. Framework de trabajo	8
3. Diseño e Implementación	9
3.1. Hardware	9
3.1.1. Diseño y fabricación	10
3.2. Firmware	10
3.2.1. Capas de abstracción	10
3.2.2. Módulos principales	10
3.3. Estructura mecánica	10
3.3.1. Modelos 3D	10
3.3.2. Fabricación de piezas custom a través de mecanizado CNC	10
4. Ensayos y resultados	11
4.1. Pruebas funcionales de hardware y rediseño	11
4.1.1. Comunicación con periféricos	11
4.1.2. Ensayo de funcionamiento continuo	11
4.2. Pruebas funcionales firmware y rediseño	11
4.2.1. Tiempo de ejecución de programas	11
4.3. Calibración mecánica del equipo	11
4.4. Pruebas de campo con personal capacitado	11
5. Conclusiones	13
5.1. Conclusiones generales	13
5.2. Próximos pasos	13
Bibliografía	15

v

Índice de figuras

1.1. Centro Tecnológico FUNINTEC.	2
1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo.	2
1.3. Films de dióxido de titanio TiO_2 ¹	3
1.4. Equipo de la empresa Kibron.	3
1.5. Equipos de la empresa Biolin Scientific.	4
1.6. Equipo de la empresa Bungard.	4
2.1. Espesor vs velocidad. Imagen tomada de [11].	7
2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130.	9
2.3. Diagrama en bloques TMC5130.	9
2.4. Función stallGuard2.	10
2.5. Función coolStep.	11
2.6. Guía Lineal IGUS.	13
2.7. Esquema propuesto.	14
3.1. Modelo 3D Kicad.	15
3.2. Placa fabricada MAYER SRL.	16

v

Índice de figuras

1.1. Centro Tecnológico FUNINTEC.	2
1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo.	2
1.3. Films de dióxido de titanio TiO_2 ¹	3
1.4. Equipo de la empresa Kibron.	3
1.5. Equipos de la empresa Biolin Scientific.	4
1.6. Equipo de la empresa Bungard.	4
2.1. Módulos principales de firmware.	7
3.1. Modelo 3D Kicad.	9
3.2. Placa fabricada MAYER SRL.	10

Índice de tablas

1.1. Dip coaters en el mercado	4
2.1. Comparación Stone	12

Índice de tablas

1.1. Dip coaters en el mercado	4
--	---

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.

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 **a construir**.

1.1. El contexto Tecsci

La **realización del siguiente proyecto se basa** en la construcción de un equipo comercial *Dip Coater*. El **proyecto se desarrolla** 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] **contando así con todo el material necesario** 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 la **Fundación Unsam Innovación y Tecnología (FUNINTEC)** y sus instalaciones se encuentran dentro del Campus Miguelete en la **Universidad Nacional de San Martín (UNSAM)**.

El impacto de esta incubación es positivo, ya que brinda **las herramientas necesarias** 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**, 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.

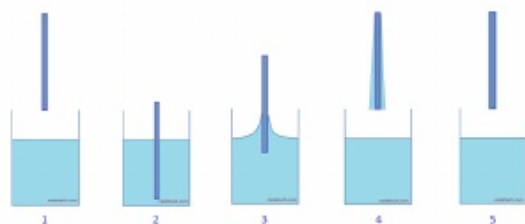


FIGURA 1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo.

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 films de dióxido de titanio TiO_2 en la figura 1.3. En la imagen A el film se preparó sobre un wafer de silicio y en la imagen B sobre un portaobjeto de vidrio.



FIGURA 1.1. Centro Tecnológico FUNINTEC.

Esto fue posible luego del esfuerzo de los trabajadores de la empresa TECSCI que dejaron en condiciones el lugar y recuperaron los equipos de producción luego de años de abandono. También la empresa 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 en la industria, como en la investigación científica en el campo de las nanociencias, se basa en la inmersión y extracción controlada de una muestra en una solución bajo estudio, en la Figura 1.2 se observa una ejecución completa del movimiento desarrollado por el equipo.

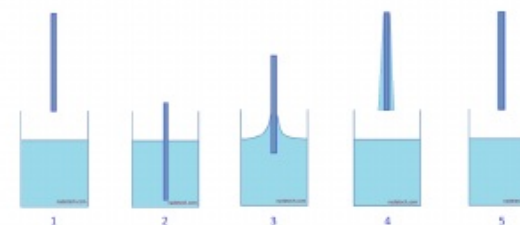
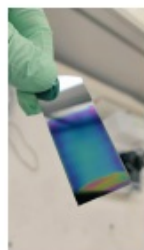


FIGURA 1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo.

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.

1.3. Dip coaters en el mercado

3



(A) Film sobre wafer de silicio.



(B) Film sobre portaobjeto.

FIGURA 1.3. Films de dióxido de titanio TiO_2 ¹.

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 [4].



FIGURA 1.4. Equipo de la empresa Kibron.

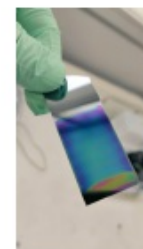
En la figura 1.5 podemos ver los equipos de la empresa Biolin Scientific [5], un equipo simple y otro con mayor funcionalidad. Si bien ambos controlan con exactitud la velocidad de inmersión y extracción, el último agrega una funcionalidad extra, que a través de una rotación en la base da la posibilidad 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.

¹Imagen tomada en los laboratorios del Instituto de Nanosistemas de la Unsam

1.3. Dip coaters en el mercado

3

Como ejemplo de los resultados que se obtienen aplicando esta técnica podemos observar en la figura 1.3 films de dióxido de titanio TiO_2 , en la primer imagen el film se preparó sobre un wafer de silicio y en la segunda sobre un porta muestra de vidrio.



(A) Film sobre wafer de silicio.



(B) Film sobre portaobjeto.

FIGURA 1.3. Films de dióxido de titanio TiO_2 ¹.

Cabe destacar que los espesores logrados en este experimento fueron entre 180 nm a 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**, **presentamos** a continuación algunos **equipos** de diferentes fabricantes.

Podemos observar en la figura 1.4 el equipo de la empresa Kibron [4].



FIGURA 1.4. Equipo de la empresa Kibron.

En la figura 1.5 podemos ver los equipos de la empresa Biolin Scientific [5], 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

¹Imagen tomada en los laboratorios del Instituto de Nanosistemas de la Unsam



(A) Equipo simple.



(B) Equipo avanzado.

FIGURA 1.5. Equipos de la empresa Biolin Scientific.

Por último presentamos el equipo de la empresa Bungard [6], 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.

TABLA 1.1. Especificaciones técnicas de otros equipos

Equipo	Recorrido	Velocidad (mm/min)	Acel (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/botones
Ossila [7]	100 mm	0.6 - 3000	no	pc
Holmarc [8]	100 mm	1.08 - 540	no	pc

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

la cual a través de una rotación en la base da la posibilidad de cambiar automáticamente las soluciones donde se realizan las inmersiones. Ambos equipos necesitan estar conectados a una pc 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 [6], 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.

TABLA 1.1. Especificaciones técnicas de otros equipos

Equipo	Recorrido	Velocidad (mm/min)	Acel (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/botón
Ossila [7]	100 mm	0.6 - 3000	no	pc
Holmarc [8]	100 mm	1.08 - 540	no	pc

Podemos entonces extraer al menos dos conclusiones, ninguno de los equipos permite al usuario tener control sobre la aceleración en los movimientos de inmersión y extracción de muestra, y la mayoría dependen de una comunicación usb-serial con una computadora para poder ser ejecutados.

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:

- Uso del driver TMC5130 [9].
- Diseño de hardware con software de diseño KICAD [10].
- 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.

1.4. Objetivos y alcance

1.4.1. Objetivos

El objetivo de este trabajo es que la empresa TECSCI diseñe y fabrique su primer equipo comercial, con la perspectiva de ser el primero de una serie más amplia 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 de configuración de equipo moderno.

1.4.2. Alcance

El presente proyecto incluye la presentación de un equipo comercial Dip Coater.

Abarca los siguientes puntos:

- Desarrollo del Firmware que contemple la comunicación con driver del fabricante TRINAMIC, específicamente el TMC5130.
- Diseño del Hardware con software de diseño KICAD.
- Fabricación del PCB y montaje de componentes electrónicos.
- Diseño y Fabricación de la parte mecánica soporte del equipo y fabricación de piezas especiales a través de mecanizado CNC.
- Incorporación de pantalla touch HMI human machine interface de la marca STONE para configuración y uso del equipo.

El presente proyecto no incluye:

- 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. Movimientos controlados

2.1.1. Estudio preliminar

Para entender la relación entre la velocidad de extracción y el espesor de material depositado se tuvo en consideración la siguiente publicación [11], 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 velocidades utilizadas, también se puede observar la relación entre los diferentes modelos aplicados.

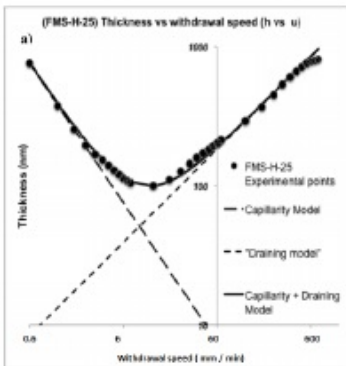


FIGURA 2.1. Espesor vs velocidad. Imagen tomada de [11].

Capítulo 2

Introducción específica

2.1. Equipo propuesto

2.1.1. Elección de las tecnologías

Como se observa en la Figura 2.1, la máquina Dip Coater que se desarrollará estará compuesta por:

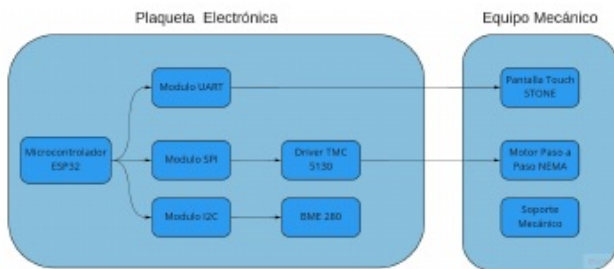


FIGURA 2.1. Módulos principales de firmware.

- Microcontrolador ESP32
- Periféricos UART SPI I2C
- Driver para manejo de motor TRINAMIC TMC 5130
- Comunicación con Stone Display HMI

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 nuestro equipo de todos los equipos comerciales analizados en la sección 1.3.

2.1.2. Circuitos Integrados Trinamic

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

- El equipo deberá contar para realizar los movimientos con un motor paso a paso Nema 17.
- Se utilizará un driver de motor de la marca TRINAMIC.

TRINAMIC Motion Control [12] 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, que garantiza en cierta medida la calidad de sus productos, actualmente fue adquirida por la compañía Analog Devices.

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. En nuestro caso como ya tenemos definido la utilización de un motor paso a paso vamos a trabajar con el último integrado diseñado para tal fin, el driver TMC5130.

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.

El TMCL-IDE se ejecuta sobre una placa de desarrollo general compatible con diferentes kits de evaluación. En la figura 2.2 podemos observar a izquierda la

2.2. Movimientos controlados

2.2.1. Integrados Trinamic

2.2.2. Driver TMC5130

2.3. Interfaz de usuario

2.3.1. Pantalla Stone

2.4. Framework de trabajo

placa Startrampe que se conecta entre la computadora y la placa de evaluación TMC5130-Eval que se observa a derecha.

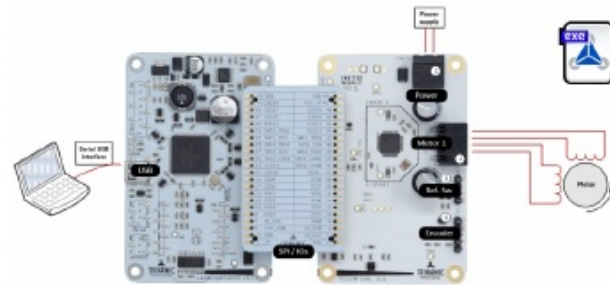


FIGURA 2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130.

2.1.3. 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 de nuestro 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.

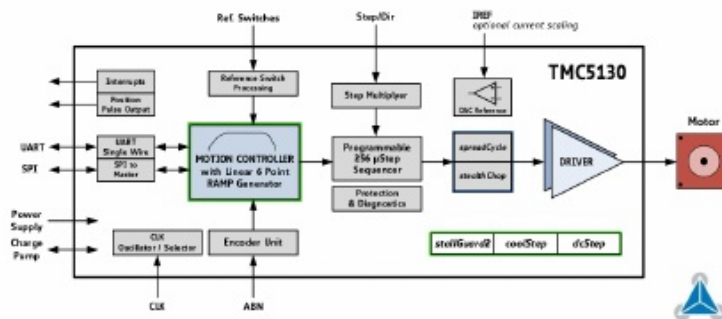


FIGURA 2.3. Diagrama en bloques TMC5130.

La comunicación con el CI se puede establecer a través del protocolo UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) o SPI (*Serial Peripheral Interface*), en el caso de nuestro equipo utilizaremos la 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

Capítulo 3

Diseño e Implementación

3.1. Hardware

Como se detallo en el capítulo 2 las primeras pruebas fueron realizadas con la placa experimental TMC5130-EVAL, en la web de la empresa [9] se pueden encontrar los diseños de todas las placas de evaluación que la misma comercializa. También se analizaron varios esquemáticos de los módulos de desarrollo **NODE-MCU** del microcontrolador ESP32, este último al ser un producto de venta masiva cuenta con gran cantidad de información y ejemplos de implementaciones. Por lo tanto el diseño de nuestra placa surge del análisis de las implementaciones anteriores. Para el diseño del *hardware* utilizamos el software libre de diseño de circuitos impresos **KICAD**, cabe destacar que este software a avanzado y mejorado en cuanto a sus capacidades técnicas en los últimos años, es posible que el apoyo del **CERN** haya influenciado de manera positiva tal como se comenta en la siguiente nota [10].

3.1.3.2

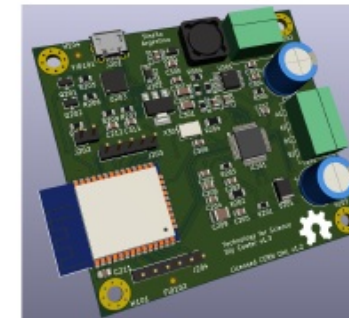


FIGURA 3.1. Modelo 3D Kicad.

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 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.

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

En nuestro equipo el motor estará acoplado a un eje lineal para generar un movimiento. Por lo tanto cada micropaso del motor estará asociado a un desplazamiento lineal que se analizará en el capítulo 3.

Otra funcionalidad que se utilizará es *Stallguard2*, una función de alta precisión que mide la fuerza contraelectromotriz generada en la bobinas del motor por cambios de carga en el eje. Como se observa en la figura 2.4 el valor de stallguard se decrementa linealmente a medida que la carga en el eje del motor aumenta. En nuestro caso se utilizará esta funcionalidad para realizar un posicionamiento inicial que servirá de referencia para todos los desplazamientos posteriores. Cada vez que el equipo se enciende que ejecuta esta funcionalidad para buscar el respectivo cero de máquina.

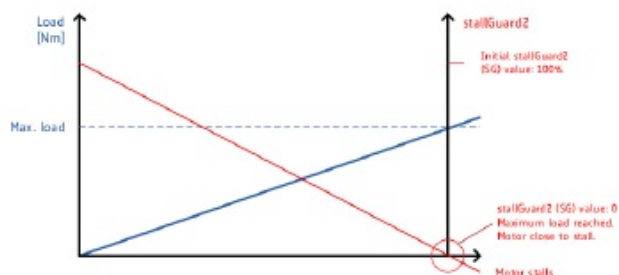


FIGURA 2.4. Función stallGuard2.

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 como puede observarse en la figura 2.5, cuyo efecto reduce la energía según hojas de datos [9] hasta un 75 %. Incluso en aplicaciones en donde la carga es constante como es el caso de nuestro equipo.

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



FIGURA 3.2. Placa fabricada MAYER SRL.

3.1.1. Diseño y fabricación

3.2. Firmware

3.2.1. Capas de abstracción

3.2.2. Módulos principales

3.3. Estructura mecánica

3.3.1. Modelos 3D

3.3.2. Fabricación de piezas custom a través de mecanizado CNC

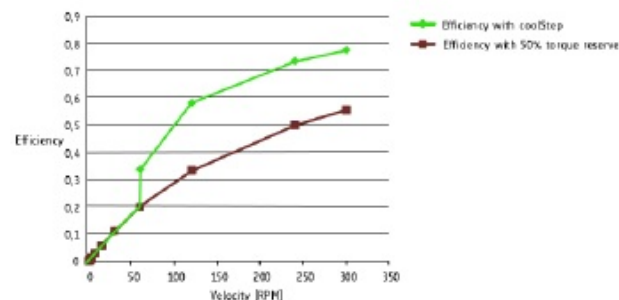


FIGURA 2.5. Función coolStep.

establecida se ajusta a una velocidad menor para poder seguir en movimiento y no detenerse por completo.

El driver TMC5130 cuenta con 50 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 se darán más detalles de los registros configurados con la ayuda del software TMCL-IDE.

2.2. 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:

- 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. Cuentan con un software de diseño para la creación de la interfaz gráfica, que a través de un protocolo de comunicación definido por cada fabricante interactúa con el sistema de control, permitiendo finalmente controlar y configurar el equipo. En nuestro caso 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 [13]. El fabricante ofrece un catálogo amplio de equipos y en nuestro caso por las dimensiones finales del equipo se optó por pantallas de 4.3 pulgadas. Se detalla en la tabla 2.1 las características técnicas de dos pantallas de 4.3 pulgadas del fabricante.

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 mecánica del equipo

4.4. Pruebas de campo con personal capacitado

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	256MB	128MB
Color	262 K	65 K
PCB	2.0mm black, ROHS	1.6mm 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 realizará a través del protocolo UART.

2.3. 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 [14], que cuenta con diferentes modelos y dimensiones de perfiles necesarios para la fabricación de la estructura.

El equipo también contará 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 [15], 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.

Para el diseño y fabricación de piezas mecanizadas en aluminio se trabajó con BOBCAD [16], un software CAD/CAM (*Computer-Aided Design /Computer-Aided Manufacturing*) utilizado en la industria manufacturera.

Con la parte CAD diseñamos un primer modelo 3D de pieza y en nuestro caso antes de comenzar con el módulo CAM, realizamos una impresión 3D con filamento PLA para probar las dimensiones y factibilidad de la pieza. Una vez que el modelo queda aprobado comenzamos con el módulo CAM, este modulo se encarga de convertir el modelo 3D en lenguaje de máquina que el equipo puede interpretar. En el taller mecánico contamos con una Fresadora CNC (*computer numerical control*) de la marca FAGOR [17] que interpreta G-CODE también conocido como RS-274 [18].

En el capítulo 3 se darán detalles mas precisos de las piezas fabricadas.

2.4. Equipo 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 de realizará sobre un módulo microcontrolador ESP32.
- Deberá registrar variables de presión y temperatura [opcional].

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones generales

La idea de esta sección es resaltar cuáles son los principales aportes del trabajo realizado y cómo se podría continuar. Debe ser especialmente breve y concisa. Es buena idea usar un listado para enumerar los logros obtenidos.

Algunas preguntas que pueden servir para completar este capítulo:

- ¿Cuál es el grado de cumplimiento de los requerimientos?
- ¿Cuán fielmente se pudo seguir la planificación original (cronograma incluido)?
- ¿Se manifestó algunos de los riesgos identificados en la planificación? ¿Fue efectivo el plan de mitigación? ¿Se debió aplicar alguna otra acción no contemplada previamente?
- Si se debieron hacer modificaciones a lo planificado ¿Cuáles fueron las causas y los efectos?
- ¿Qué técnicas resultaron útiles para el desarrollo del proyecto y cuáles no tanto?

5.2. Próximos pasos

Acá se indica cómo se podría continuar el trabajo más adelante.

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 [19].

El ESP32 es un módulo del tipo SoC (*system on a chip*) que integra mayores prestaciones a demás de su de unidad de procesamiento. Para almacenar los programas generados por el usuario se utilizará la memoria flash incorporada en el módulo.

Teniendo en cuenta los requerimientos analizados en las secciones previas y los requerimientos analizados en esta sección se propone como puede observarse en la figura 2.7 el siguiente esquema de equipo dip coater.

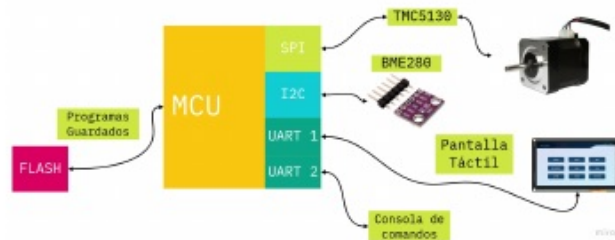


FIGURA 2.7. Esquema propuesto.

1. Módulo ESP32-WROOM.
2. Consola de comandos para establecer una comunicación entre el equipo y una computadora (Protocolo UART)
3. Driver TMC5130 (Protocolo SPI).
4. Pantalla táctil STONE STWI043WT (Protocolo UART).
5. Almacenamiento de programas (FLASH Interna).

Capítulo 3

Diseño e Implementación

3.1. Hardware

Como se detalló en el capítulo 2 las primeras pruebas fueron realizadas con la placa experimental TMC5130-EVAL. Se analizó entonces el diseño de los módulos de hardware que se pueden encontrar en la web oficial[12]. También se analizaron varios esquemáticos de los módulos de desarrollo NODE-MCU del módulo ESP32, que al ser un producto de venta masiva cuenta con gran cantidad de información y ejemplos de implementaciones. Por lo tanto el diseño de nuestra placa surge del análisis de las implementaciones anteriores.

Para el diseño del hardware utilizamos el software libre de diseño de circuitos impresos KICAD [10], que en sus últimas versiones presentó mejoras significativas respecto a sus predecesoras.

3.1.3.2

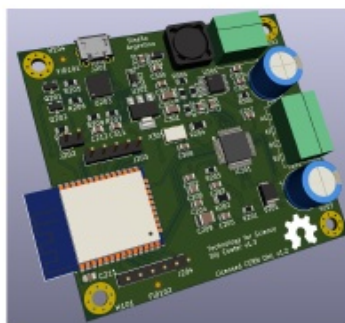


FIGURA 3.1. Modelo 3D Kicad.

Bibliografía

- [1] OSH. *Open Source Hardware Association*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.oshwa.org/definition/spanish/>.
- [2] Martin Abel Gambarotta. *Firmware*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://gitlab.com/tecsci/dipcoater>.
- [3] Martin Abel Gambarotta. *Hardware*. Visitado el 15-03-2022. URL: https://github.com/martinch14/tecsci_dipcoater_hardware_kicad.
- [4] Kibron. *Dip coater*. Visitado el 04-01-2022. URL: <https://www.kibron.com/layerx-134>.
- [5] Biolin Scientific. *Dip coater*. Visitado el 04-01-2022. URL: <https://www.biolinscientific.com/ksvlima/fabrication-and-deposition-of-thin-films/dip-coaters>.
- [6] Bungard. *Dip coater machine*. Visitado el 15-03-2022. URL: <https://www.bungard.de/en/machines/dip-coaters/rdc-15>.
- [7] Ossila. *Dip coater machine*. Visitado el 08-03-2022. URL: <https://www.ossila.com/products/dip-coater>.
- [8] Holmarc. *Dip coater machine*. Visitado el 10-03-2022. URL: https://www.holmarc.com/dip_coating_unit.php.
- [9] Trinamic. *Motion Control*. URL: <https://www.trinamic.com/>.
- [10] Antonella Del Rosso. *KiCad software gets the CERN treatment*. 2015. URL: <https://home.cern/news/news/computing/kicad-software-gets-cern-treatment>.