



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 (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.

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. Contexto | 1 |
| 1.2. Técnicas de dip coating | 2 |
| 1.3. Dip coaters en el mercado | 3 |
| 1.4. Objetivos y alcance | 5 |
| 1.4.1. Objetivos | 5 |
| 1.4.2. Alcance | 5 |
| 2. Introducción específica | 7 |
| 2.1. Estudio preliminar | 7 |
| 2.2. Circuitos integrados Trinamic | 8 |
| 2.2.1. Driver TMC5130 | 9 |
| 2.3. Interfaz de usuario | 11 |
| 2.4. Estructura mecánica | 12 |
| 2.5. Sistema electrónico propuesto | 14 |
| 3. Diseño e Implementación | 17 |
| 3.1. Hardware | 17 |
| 3.1.1. Diseño basado en módulos de hardware libre | 17 |
| 3.1.2. Fabricación | 20 |
| 3.2. Firmware | 21 |
| 3.2.1. Capas de abstracción | 21 |
| 3.2.2. Framework de trabajo | 21 |
| 3.2.3. Módulos principales | 21 |
| 3.3. Estructura mecánica | 21 |
| 3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecanizado CNC | 21 |
| 3.3.2. Modelos 3D y real | 23 |
| 4. Ensayos y resultados | 25 |
| 4.1. Pruebas funcionales de hardware y rediseño | 25 |
| 4.1.1. Comunicación con periféricos | 25 |
| 4.1.2. Ensayo de funcionamiento continuo | 25 |
| 4.2. Pruebas funcionales firmware y rediseño | 25 |
| 4.2.1. Tiempo de ejecución de programas | 25 |
| 4.3. Calibración del equipo | 25 |
| 4.3.1. Desplazamiento lineal y micropasos | 25 |
| 4.4. Pruebas de campo con personal capacitado | 25 |
| 5. Conclusiones | 27 |
| 5.1. Resultados obtenidos | 27 |

IV

Bibliografía

21

IV

5.2. Próximos pasos 1 27

Bibliografía

29

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 1.1. Centro Tecnológico FUNINTEC. | 2 |
| 1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo. | 2 |
| 1.3. Films de dioxido 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 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 1.1. Centro Tecnológico FUNINTEC. | 2 |
| 1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo ¹ . | 2 |
| 1.3. Films de dioxido de titanio TiO ₂ ² . | 3 |
| 1.4. Equipo de la empresa Kibron. | 4 |
| 1.5. Equipos de la empresa Biolin Scientific. | 4 |
| 1.6. Equipo de la empresa Bungard. | 4 |
| 2.1. Espesor vs velocidad ³ . | 7 |
| 2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación TMC5130 ⁴ . | 9 |
| 2.3. Diagrama en bloques TMC5130 ⁵ . | 10 |
| 2.4. Función stallguard2 ⁶ . | 10 |
| 2.5. Función coolstep ⁷ . | 11 |
| 2.6. Guía Lineal IGUS ⁸ . | 13 |
| 2.7. Fresadora Fagor GVC 600 ⁹ . | 14 |
| 2.8. Esquema de equipo propuesto. | 15 |
| 3.1. Clock para el CI TMC5130. | 17 |
| 3.2. Módulo de entrada. | 18 |
| 3.3. CI TMC5130. | 18 |
| 3.4. Conversor UART-USB. | 19 |
| 3.5. Modelo 3D Kicad. | 19 |
| 3.6. Placa fabricada MAYER SRL. | 20 |
| 3.7. Pieza personalizada para el carro. | 21 |
| 3.8. Piezas personalizado para sostener estructura superior. | 21 |
| 3.9. Estrategias de mecanizado en software Bodcad. | 22 |
| 3.10. Modelo 3D. | 23 |
| 3.11. Primer prototipo dip coater TECSPI. | 24 |
| 4.1. Ensayo de desplazamiento lineal con micrómetro. | 26 |
| 4.2. Micrómetro digital Asimeto. | 26 |

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 | 5 |
| 2.1. Comparación Stone | 12 |

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 construido.

1.1. Contexto

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

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

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

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

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

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

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



FIGURA 1.1. Centro Tecnológico FUNINTEC.

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

1.2. Técnicas de dip coating

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

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

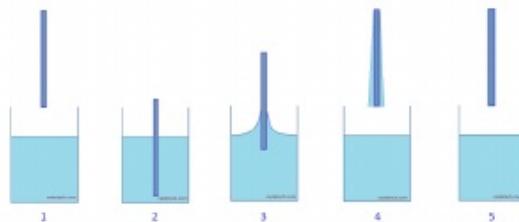


FIGURA 1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo.

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 deseé.

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.



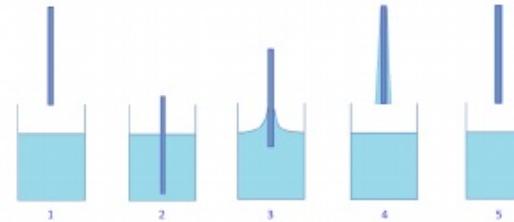
FIGURA 1.1. Centro Tecnológico FUNINTEC.

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

1.2. Técnicas de dip coating

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

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

FIGURA 1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo ¹.

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

¹Imagen tomada de [4]

1.3. Dip coaters en el mercado

3



(A) Film sobre wafer de silicio.



(B) Film sobre portaobjeto.

FIGURA 1.3. Films de dioxido de titanio TiO₂¹.

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

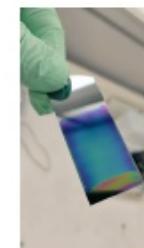
3

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

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

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

Como ejemplo de los resultados que se obtienen aplicando esta técnica podemos observar en la figura 1.3 films de dioxido de titanio TiO₂. 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 TiO₂².

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

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

1.3. Dip coaters en el mercado

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

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

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

²Imagen 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.



FIGURA 1.4. Equipo de la empresa Kibron.

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



(A) Equipo simple.



(B) Equipo avanzado.

FIGURA 1.5. Equipos de la empresa Biolin Scientific.

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



FIGURA 1.6. Equipo de la empresa Bungard.

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

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

1.4. Objetivos y alcance

5

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

5

TABLA 1.1. Especificaciones técnicas de otros equipos.

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

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

1.4. Objetivos y alcance**1.4.1. Objetivos**

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

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

1.4.2. Alcance

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

Abarcó los siguientes puntos:

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

El trabajo no incluyó:

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

Capítulo 2

Introducción específica

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

2.1. 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.

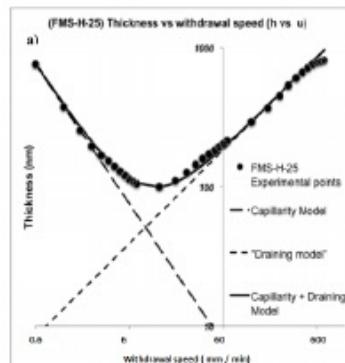


FIGURA 2.1. Espesor vs **velocidad**. Imagen tomada de [11].

Capítulo 2

Introducción específica

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

2.1. Estudio preliminar

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

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

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

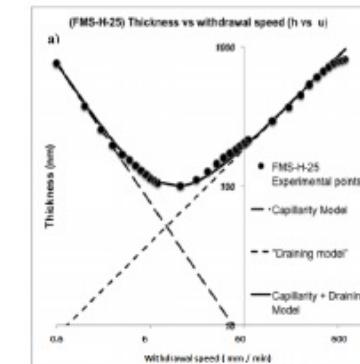


FIGURA 2.1. Espesor vs **velocidad**¹.

¹Imagen tomada de [12].

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

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

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

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

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

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

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

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

2.2. Circuitos integrados Trinamic

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

- El equipo deberá contar con un motor paso a paso Nema 17 [13] para realizar los movimientos.
- Se utilizará un driver de motor de la marca TRINAMIC.

Trinamic Motion Control [10] se especializa en la fabricación de CI (**Circuitos Integrados**) para el control de diferentes tipos de motores, su lema se basa en convertir señales digitales en movimientos controlados. Tiene una experiencia de veinte años en la industria del control de motores, lo que garantiza en cierta medida la calidad de sus productos, actualmente fue adquirida por la compañía Analog Devices [14].

Cabe destacar que los integrados fabricados por la empresa Trinamic se utilizan en diversas aplicaciones en donde la precisión es importante, como por ejemplo impresión 3D, automatización industrial, robótica y equipos de laboratorio médico entre otras. Cuenta con una amplia gama de productos que se diferencian principalmente según el tipo de motor que se quiera accionar. **Luego de estudiar las diferentes alternativas ofrecidas se eligió trabajar con el driver TMC5130 [15].**

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

2.1. Movimientos controlados

9

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

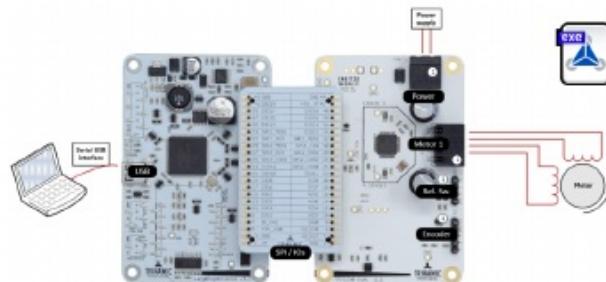


FIGURA 2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación **TMC5130**.

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.

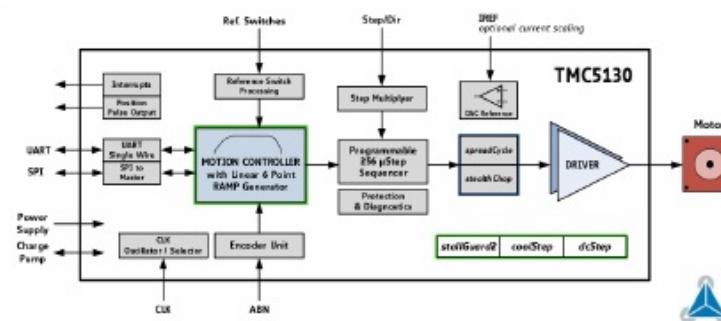


FIGURA 2.3. Diagrama en bloques TMC5130.

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

2.2. Circuitos integrados Trinamic

9

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.

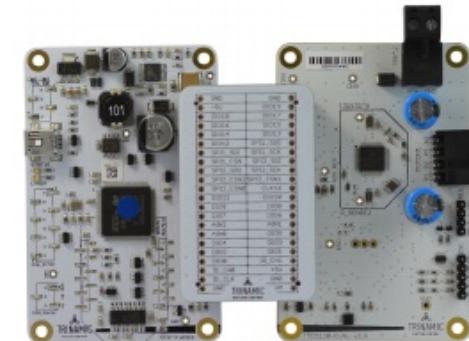


FIGURA 2.2. Placa de desarrollo Startrampe + placa de evaluación **TMC5130**².

2.2.1. Driver TMC5130

El driver TMC5130 permite operar motores bipolares de dos fases comúnmente conocidos como motores paso a paso. El CI incorpora una etapa de potencia con tecnología **MOSFET** (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) que permite manejar corrientes de hasta dos amperios por fase. En el caso del dip coater el peso de la carga es despreciable, por lo tanto la corriente es suficiente. Se realizarán en el capítulo 4 los respectivos ensayos.

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

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

Una característica importante a destacar es la posibilidad de programar la cantidad de pasos que da el motor. Los pasos están relacionados con las fases y con la cantidad de dientes que tiene el rotor y estator del motor. Un paso es el movimiento mínimo que el motor puede hacer. Un motor paso a paso, como su nombre lo indica, realiza movimientos a través de pasos sucesivos. Por ejemplo es común contar con algún motor en donde la especificación dice que el paso es de (1.8°) , esto significa que por cada vuelta de motor (360°) el motor realizará 200 pasos.

Una funcionalidad que incorpora este CI es incrementar la cantidad de pasos, el fabricante los denomina micropasos, el driver puede generar hasta un máximo de

²Imagen tomada de [10].

³Imagen tomada de [10].

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 las 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.

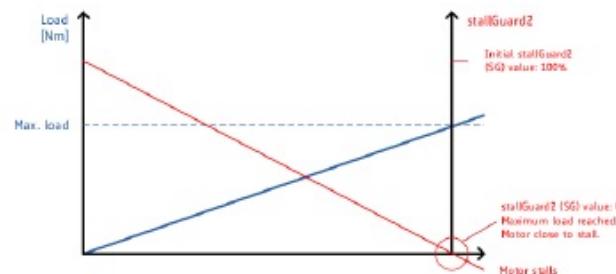


FIGURA 2.4. Función *stallGuard2*.

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 commutación 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

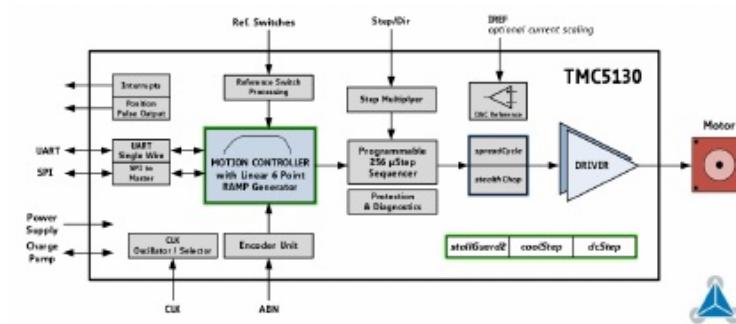


FIGURA 2.3. Diagrama en bloques TMC5130.³

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

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

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

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

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

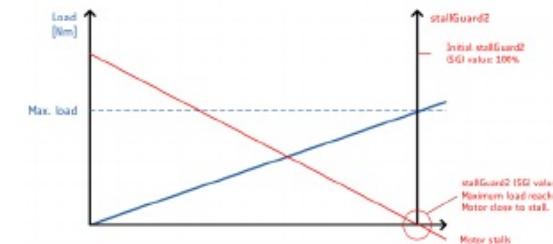


FIGURA 2.4. Función *stallGuard2*.⁴

³Imagen tomada de [10].

2.2. Interfaz de usuario

11

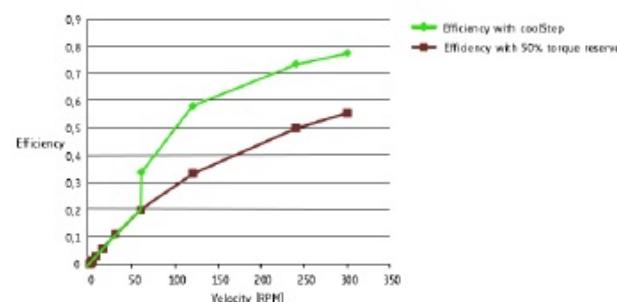


FIGURA 2.5. Función coolStep.

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 de 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.

2.3. Interfaz de usuario

11

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

También se utilizará coolstep, una función que a través de mediciones de carga en el eje del motor adapta automáticamente la corriente suministrada hacia las bobinas, aumentando la eficiencia energética como puede observarse en la figura 2.5, cuyo efecto reduce la energía suministrada según hojas de datos [15] hasta un 75 %. Incluso en aplicaciones en donde la carga es constante como es este equipo dip coater ya que la carga variable representada por un wafer de silicio o un portaobjeto es completamente despreciable.

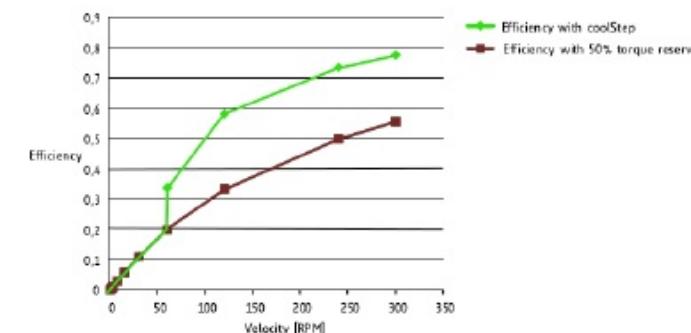


FIGURA 2.5. Función coolstep.⁵

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

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

2.3. Interfaz de usuario

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

Dando lugar al siguiente requerimiento:

⁵Imagen tomada de [10].

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 | 480x272 pixel | 480x272 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.

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

Se decidió trabajar con pantallas del tipo *HMI (Human Machine Interface)*, este tipo de pantallas incorpora una unidad de procesamiento que se encarga exclusivamente del procesamiento gráfico. En general, cuentan con un software de diseño para la creación de la interfaz gráfica, es decir que permiten crear botones, barras, pantallas y diferentes tipos de objetos para interaccionar con el usuario. Luego se le da funcionalidad a cada uno de estos objetos creados en el software y a través de un protocolo de comunicación se interactúa con el sistema de control, permitiendo finalmente controlar y configurar el equipo. En el caso de este equipo la pantalla se comunica con un microcontrolador, pero podría comunicarse con algún otro sistema de control como por ejemplo un *PLC (Programmable Logic Controller)*.

Luego de una investigación de mercado se eligió a la empresa STONE [17]. El fabricante ofrece un catálogo amplio de pantallas que caracteriza según el tipo aplicación y entorno de trabajo. Ofrece entonces pantallas para usos industriales, civiles o avanzados. Por las dimensiones finales del equipo y el tipo de uso se optó por pantallas avanzadas de 4.3 pulgadas. Se detalla en la tabla 2.1 las características técnicas de dos pantallas de 4.3 pulgadas del fabricante.

TABLA 2.1. Comparación pantallas táctiles Stone 4.3.

| | STWI043WT | STVI043WT |
|--------------|-------------------------|-----------------|
| CPU | Cortex A8 | CortexM4 |
| Refresh Rate | 1G Hz | 200 MHz |
| Image format | png, bmp, jpg, svg, gif | bmp, jpg |
| Resolution | 480x272 pixel | 480x272 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].

2.4. Equipo propuesto

13

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 módulo 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].

2.4. Estructura mecánica

13

- Las piezas especiales del equipo deben ser mecanizadas en aluminio.

Se decidió trabajar con el proveedor Perfiles de Aluminio .NET [18], que cuenta con diferentes modelos y dimensiones de perfiles necesarios para la fabricación de la estructura.

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

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

Se decidió entonces trabajar con la empresa IGUS [19], que se especializa en la fabricación de polímeros. La empresa ofrece guías lineales que se deslizan en lugar de rodar, es decir no tienen rodamientos. Los polímeros están combinados con materiales anticorrosivos y no requieren la aplicación de lubricante, es decir que conforman un entorno de trabajo limpio y libre de mantenimiento periódico. Se observa en la figura 2.6 cuatro tipos de guías en donde se puede apreciar el polímero auto-lubricado que se ubica entre el eje y el carro.



FIGURA 2.6. Guía Lineal IGUS.⁶

Para el diseño y fabricación de piezas mecanizadas en aluminio se trabajó con el software BOBCAD [20] CAD/CAM (Computer-Aided Design /Computer-Aided Manufacturing). Un software utilizado en la industria manufacturera compuesto por dos módulos fundamentales que permiten abarcar aspectos de diseño y modelado de pieza y luego de fabricación.

Con la parte CAD se diseña el modelo 3D de la pieza, para poder corregir errores de diseño con mayor velocidad se realiza una impresión 3D con filamento plástico para probar las dimensiones y la factibilidad técnica de la pieza. Una vez que el modelo en su versión plástica queda aprobado se comienza con la configuración del módulo CAM, este módulo se encarga de convertir a través de diferentes estrategias al modelo 3D en lenguaje de máquina que el equipo puede interpretar. Se observa en la imagen 2.7 la fresadora CNC (Computer Numerical Control) de la marca FAGOR [21] utilizada para la fabricación de las piezas del equipo dip

⁶Imagen tomada de [19].

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 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.

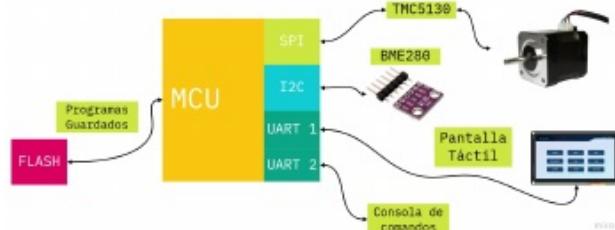


FIGURA 2.7. Esquema propuesto.

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 STW1043WT (Protocolo UART).
5. Almacenamiento de programas (FLASH Interna).

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.

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 cuanta 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

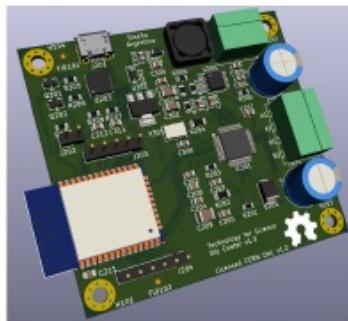


FIGURA 3.1. Modelo 3D Kicad.

2.5. Sistema electrónico propuesto

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

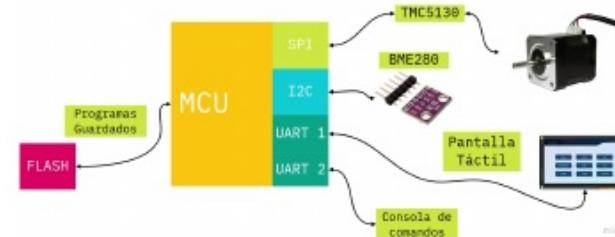


FIGURA 2.8. Esquema de equipo propuesto.

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



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. Framework de trabajo

3.2.3. Módulos principales

3.3. Estructura mecánica

3.3.1. Modelos 3D

3.3.2. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecanizado CNC

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

Capítulo 3

Diseño e Implementación

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

3.1. Hardware

3.1.1. Diseño basado en módulos de hardware libre

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

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

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

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

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

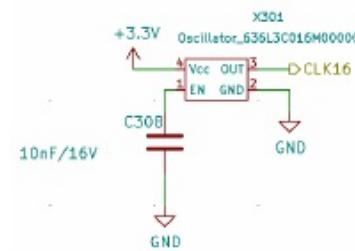


FIGURA 3.1. Clock para el CI TMC5130.

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



FIGURA 3.2. Módulo de entrada.

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

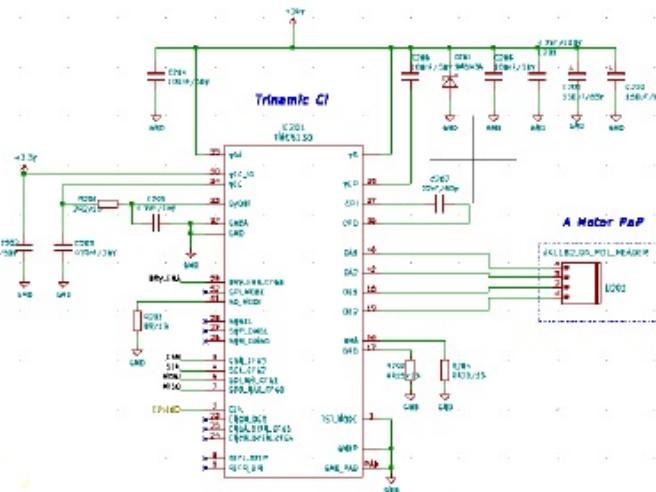


FIGURA 3.3. CI TMC5130.

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

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 las 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. Podemos entonces señalar los siguientes logros en el desarrollo del presente trabajo:

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

Lamentablemente la planificación original no pudo ser sostenida, abarcar íntegramente la fabricación de un MVP fue demasiado trabajo para los tiempos y recursos establecidos. Existieron retrasos en tareas en las cuales el autor no contaba con los conocimientos necesarios para su correcta definición, principalmente en todo el diseño y fabricación mecánica. Sin embargo, surge de este trabajo una base de conocimiento importante que permite comenzar con el desarrollo y la fabricación de otro MVP en tiempos más acotados y con una planificación más certera.

5.2. Próximos pasos

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

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

3.1. Hardware

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

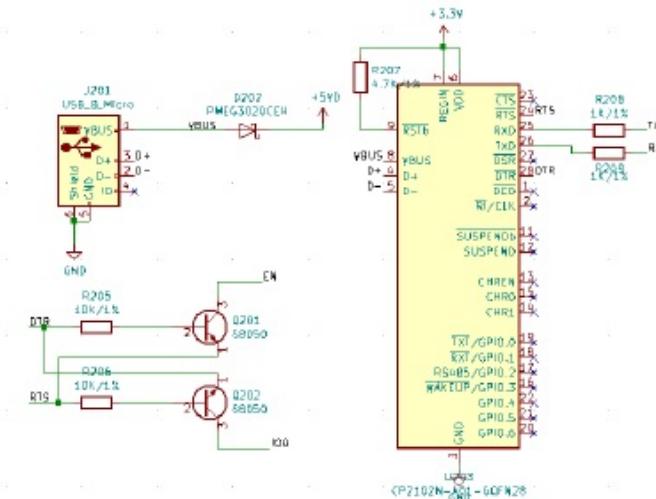


FIGURA 3.4. Conversor UART-USB.

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

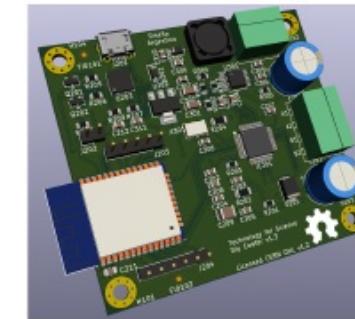


FIGURA 3.5. Modelo 3D Kicad.

- Durante el mes de junio del presente año investigadores del INS (Instituto de Nanositemas) llevarán a cabo ensayos para caracterizar el equipo. El ensayo contemplará la generación de cincuenta *films* sobre soluciones químicas de TiO₂ y SiO₂ caracterizadas a través del método XRR (reflectometría de rayos-X). Surgirá de este ensayo un documento técnico con los resultados obtenidos.
- A través de un arreglo de cooperación se entregarán dos equipos a usuarios calificados para realizar pruebas funcionales y evaluar su satisfacción. Se realizarán cambios de ser necesario.
- Se trabajará en conjunto con un diseñador industrial para convertir este MVP en un producto comercial de la empresa TECSCI.

3.1.2. Fabricación

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

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

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



FIGURA 3.6. Placa fabricada MAYER SRL.

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/tecscl/dipcoater>.
- [3] Martin Abel Gambarotta. Hardware. Visitado el 15-03-2022. URL: https://github.com/martinch14/tecscl_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/ksvnima/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. TMC5130. URL: <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc5130a-ta>.
- [10] Kicad. Open Source Electronics Design. URL: <https://www.kicad.org/>.
- [11] Marco Faustini y col. «Preparation of Sol-Gel Films by Dip-Coating in Extreme Conditions». En: *J. Phys. Chem. C* 114.17 (2010), págs. 7637-7645. DOI: 10.1021/jp9114755. URL: <https://doi.org/10.1021/jp9114755>.
- [12] Trinamic. Motion Control. URL: <https://www.trinamic.com/>.
- [13] Stoneitech. HMI Stone Display. URL: <https://www.stoneitech.com/>.
- [14] Perfiles de aluminio. .Net. Visitado el 22-03-2022. URL: <https://perfilesdealuminio.net/>.
- [15] Igus. Plastics for longer life. URL: <https://www.igus.com.ar/>.
- [16] Bobcad. Bobcad CAD/CAM. URL: <https://bobcad.com/>.
- [17] Fagor. Fagor Automation. URL: <https://www.fagorautomation.com/>.
- [18] Norma RS-274. G-Code. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=823374.
- [19] ESP. Espressif. Visitado el 23-03-2022. URL: <https://www.espressif.com/>.

3.2. Firmware

3.2.1. Capas de abstracción

3.2.2. Framework de trabajo

3.2.3. Módulos principales

3.3. Estructura mecánica

3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecanizado CNC

Como se mencionó en la sección 2.4 se utilizó para el diseño mecánico del equipo el software BOBCAD. El módulo CAD del software nos permite realizar un modelo 2D y 3D de pieza necesarios para la fabricación. El prototipo de dip coater cuenta actualmente con dos piezas mecanizadas. Podemos observar en la figura 3.7 la pieza que se acopla al carro de la guía lineal presentada en la sección 2.4.

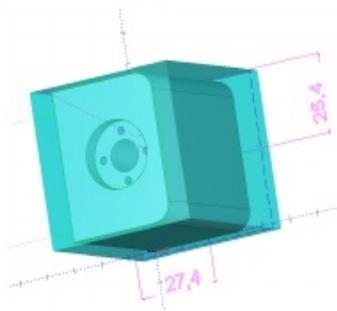


FIGURA 3.7. Pieza personalizada para el carro.

Y en la figura 3.8 el soporte superior que sostiene el motor paso a pasos y el tornillo que esta acoplado al eje del motor.

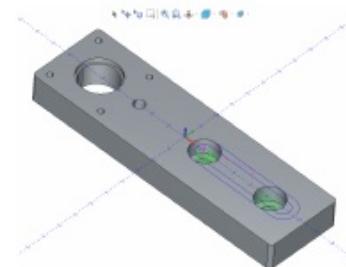


FIGURA 3.8. Piezas personalizado para sostener estructura superior.