



**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:

Esp. Ing. Alejandro Permingeat (FIUBA, DETECAP)

Esp. Ing. Diego Fernández (UBA)

Esp. Ing. Julián Iglesias (UTN)

*Este trabajo fue realizado en la Ciudad de General San Martín, Buenos Aires,
entre marzo de 2020 y julio 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 julio 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	4
1.4. Objetivos y alcance	5
1.4.1. Objetivos	5
1.4.2. Alcance	6
2. Introducción específica	7
2.1. Estudio preliminar	7
2.2. Circuitos integrados Trinamic	8
2.2.1. Driver TMC5130	9
2.3. Interfaz de usuario	11
2.4. Estructura mecánica	12
2.5. Sistema electrónico propuesto	13
2.6. Herramientas de desarrollo	15
3. Diseño e Implementación	17
3.1. Hardware	17
3.1.1. Diseño basado en módulos de hardware libre	17
3.1.2. Etapa de alimentación	17
3.1.3. Etapa de comunicación	18
3.1.4. Driver TMC5130	19
3.1.5. Diseño final	20
3.1.6. Fabricación	21
3.2. Firmware	22
3.2.1. Capas de abstracción	22
3.2.2. Módulos principales de software	23
Funcionamiento general	23
Control de movimientos	23
Consola de comandos	27
Pantalla táctil	29
Registro de variables ambientales	31
Parámetros de calibración	32
3.3. Estructura mecánica	33
3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecaniza-	
do CNC	33
Etapa CAD	33
Etapa CAM	34
3.3.2. Modelos 3D y real	35

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	4
1.4. Objetivos y alcance	5
1.4.1. Objetivos	5
1.4.2. Alcance	6
2. Introducción específica	7
2.1. Estudio preliminar	7
2.2. Circuitos integrados Trinamic	8
2.2.1. Driver TMC5130	9
2.3. Interfaz de usuario	11
2.4. Estructura mecánica	12
2.5. Sistema electrónico propuesto	13
2.6. Herramientas de desarrollo	15
3. Diseño e Implementación	17
3.1. Hardware	17
3.1.1. Diseño basado en módulos de hardware libre	17
3.1.2. Etapa de alimentación	17
3.1.3. Etapa de comunicación	18
3.1.4. Driver TMC5130	19
3.1.5. Diseño final	20
3.1.6. Fabricación	21
3.2. Firmware	22
3.2.1. Capas de abstracción	22
3.2.2. Módulos principales de software	23
Funcionamiento general	23
Control de movimientos	23
Consola de comandos	27
Pantalla táctil	29
Registro de variables ambientales	31
Parámetros de calibración	32
3.3. Estructura mecánica	33
3.3.1. Fabricación de piezas personalizadas a través de mecaniza-	
do CNC	33
Etapa CAD	33
Etapa CAM	34
3.3.2. Modelos 3D y real	34

Índice de figuras

1.1. Centro Tecnológico FUNINTEC.	2
1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo ¹	2
1.3. Films de dióxido 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.	5
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	9
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. Módulo NodeMCU + TMC5130-EVAL.	17
3.2. Módulo de entrada.	18
3.3. Conversor serie-USB.	18
3.4. Clock para el CI TMC5130.	19
3.5. CI TMC5130.	20
3.6. Modelo 3D Kicad.	20
3.7. Plaqueta electrónica final.	21
3.8. Capas de abstracción de software.	22
3.9. Software TMCL-IDE.	24
3.10. Configuración de funcionalidades stallguard2 y coolstep.	24
3.11. Configuración de rampa de seis puntos.	25
3.12. Comandos de movimientos.	28
3.13. Comandos de control.	29
3.14. Lectura de registros del driver TMC5130.	29
3.15. Datagrama desde microcontrolador hacia pantalla.	30
3.16. Datagrama desde pantalla hacia microcontrolador.	30
3.17. Secuencia de procesamientos de datos entrantes.	31
3.18. Pantalla de configuración de programa.	31
3.19. Módulo API BOSH.	32
3.20. Registro de datos en consola.	32
3.21. Unidades.	33
3.22. Pieza personalizada soporte de carro.	34
3.23. Piezas personalizada soporte de estructura superior.	34
3.24. Operaciones de mecanizado en software Boddcad.	35
3.25. Piezas fabricadas en centro de mecanizado.	36
3.26. Modelo 3D.	36
3.27. Primer prototipo dip coater TECSCI.	37

Índice de figuras

1.1. Centro Tecnológico FUNINTEC.	2
1.2. Proceso completo desarrollado por el equipo ¹	2
1.3. Films de dióxido 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.	5
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	9
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. Módulo NodeMCU + TMC5130-EVAL.	17
3.2. Módulo de entrada.	18
3.3. Conversor serie-USB.	18
3.4. Clock para el CI TMC5130.	19
3.5. CI TMC5130.	20
3.6. Modelo 3D Kicad.	20
3.7. Plaqueta electrónica final.	21
3.8. Capas de abstracción de software.	22
3.9. Software TMCL-IDE.	24
3.10. Configuración de funcionalidades stallguard2 y coolstep.	24
3.11. Configuración de rampa de seis puntos.	25
3.12. Comandos de movimientos.	28
3.13. Comandos de control.	29
3.14. Lectura de registros del driver TMC5130.	29
3.15. Datagrama desde microcontrolador hacia pantalla.	30
3.16. Datagrama desde pantalla hacia microcontrolador.	30
3.17. Secuencia de procesamientos de datos entrantes.	31
3.18. Pantalla de configuración de programa.	31
3.19. Módulo API BOSH.	32
3.20. Registro de datos en consola.	32
3.21. Unidades.	33
3.22. Pieza personalizada soporte de carro.	34
3.23. Piezas personalizada soporte de estructura superior.	35
3.24. Operaciones de mecanizado en software Boddcad.	36
3.25. Piezas fabricadas en centro de mecanizado.	37
3.26. Modelo 3D.	37
3.27. Primer prototipo dip coater TECSCI.	38



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

Del análisis de la tabla se pueden 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, ninguna de las empresas adhiere a los principios del software y hardware libre.

También es importante aclarar que las investigaciones realizadas indican que el rango de velocidades más utilizado para la generación de *films* es el de 1 a 200 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$. Se destaca que la mayoría de los equipos presentados cumplen con dicha indicación.

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.



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 (mm)	Velocidad (mm/min)	Aceleración (m/min ²)	Interface	Open Source Hardware
Bio Single	300	1 - 1000	no	PC	no
Bio Multiplie	70	0.1 - 108	no	PC	no
Kibron LayerX	134	0.06 - 300	no	PC	no
Bungard	600	30 - 10000	no	Display LCD	no
Ossila	100	0.6 - 3000	no	PC	no
Holmarc	100	1.08 - 540	no	PC	no

Del análisis de la tabla se pueden 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, ninguna de las empresas adhiere a los principios del software y hardware libre.

También es importante aclarar que las investigaciones realizadas indican que el rango de velocidades más utilizado para la generación de *films* es el de 1 a 200 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$. Se destaca que la mayoría de los equipos presentados cumplen con dicha indicación.

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.

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

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

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

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

2.2. Circuitos integrados Trinamic

De reuniones con el cliente en donde se remarcó 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 [12] para realizar los movimientos.
- Se utilizará un driver de motor de la marca Trinamic Motion Control.

Trinamic [9] se especializa en la fabricación de CI (Circuitos Integrados) para el control de diferentes tipos de motores, su tecnología se basa en convertir señales digitales en movimientos controlados. Tiene una amplia experiencia en la industria del control de motores y sus CI son utilizados en una gran variedad de productos. Recientemente fue adquirida por la compañía Analog Devices [13].

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 [14].

Todos los CI requieren una configuración inicial de parámetros que depende del tipo de motor y de la carga asociada al mismo. Para encontrarla la empresa ofrece el software TMCL-IDE y diferentes placas de desarrollo para trabajar sobre los diferentes drivers. La placa de desarrollo que corresponde al integrado seleccionado es la TMC5130-Eval Evaluation Board [15].

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

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

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

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

2.2. Circuitos integrados Trinamic

De reuniones con el cliente en donde se remarcó 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 [12] para realizar los movimientos.
- Se utilizará un driver de motor de la marca Trinamic Motion Control.

Trinamic [9] se especializa en la fabricación de CI (Circuitos Integrados) para el control de diferentes tipos de motores, su tecnología se basa en convertir señales digitales en movimientos controlados. Tiene una amplia experiencia en la industria del control de motores y sus CI son utilizados en una gran variedad de productos. Actualmente fue adquirida por la compañía Analog Devices [13].

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 [14].

Todos los CI requieren una configuración inicial de parámetros que depende del tipo de motor y de la carga asociada al mismo. Para encontrarla la empresa ofrece el software TMCL-IDE y diferentes placas de desarrollo para trabajar sobre los diferentes drivers. La placa de desarrollo que corresponde al integrado seleccionado es la TMC5130-Eval Evaluation Board [15].

FIGURA 2.7. Fresadora Fagor GVC 600.⁷

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

De reuniones con el cliente y de la necesidad de trabajar con un equipo que permita a futuro contar con una comunicación Wi-Fi, surgió el requerimiento de trabajar con el módulo ESP32 [22]. El ESP32 es un módulo del tipo SoC (*System On Chip*), es decir que además del microcontrolador y sus periféricos internos, agrega periféricos externos para brindar conectividad inalámbrica y almacenamiento extra para datos y programa.

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

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

FIGURA 2.7. Fresadora Fagor GVC 600.⁷

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

De reuniones con el cliente y de la necesidad de trabajar con un equipo que permita a futuro contar con una comunicación Wi-Fi, surgió el requerimiento de trabajar con el módulo ESP32 [22]. El ESP32 es un módulo del tipo SoC (*System On Chip*), es decir que además del microcontrolador y sus periféricos internos, agrega periféricos externos para brindar conectividad inalámbrica y almacenamiento extra para datos y programa.

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

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

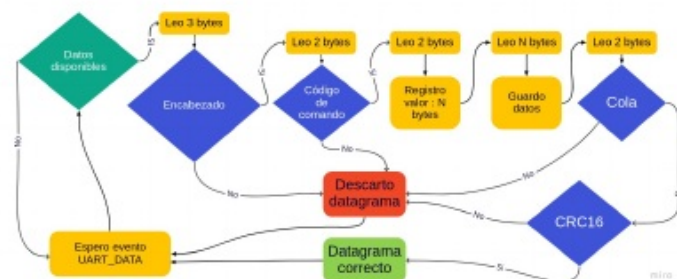


FIGURA 3.17. Secuencia de procesamientos de datos entrantes.

New protocol				
	Inmersion		Withdrawal	
Speed [mm/min]	10		20	
Acceleration [mm/min²]	1000		1000	
Waiting Time [s]	5		10	
Substrate Position	25	Depth	20	Cycles 4

FIGURA 3.18. Pantalla de configuración de programa.

Registro de variables ambientales

En la sección 2.5 se presentó el requerimiento opcional que establece el registro de variables de humedad, presión y temperatura. El interés del cliente se fundamenta en que ciertos experimentos necesitan realizarse a humedad y temperatura controlada. Esta primera implementación solo monitorea las variables y no realiza ningún control de corrección sobre las mismas.

Para el registro de estas variables se incorporó al sistema un sensor BME280. El mismo integra en un solo CI sensores de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa. El fabricante ofrece en sus repositorios [31] ejemplos de implementaciones y una API para utilizar todas las funcionalidades del integrado.

La comunicación entre el sensor y el microcontrolador se realizó a través del protocolo I2C. Se incorporó el módulo de software BOARD I2C que se encarga de inicializar el periférico I2C. También se implementó el módulo API BOSH BME, que trabaja con todas las funcionalidades que ofrece el fabricante en su API. En la figura 3.19 se puede observar el detalle de las capas desarrolladas.

API BOSH BME inicializa una estructura que define los siguientes parámetros:

- Dirección del dispositivo I2C.
- Función de lectura.

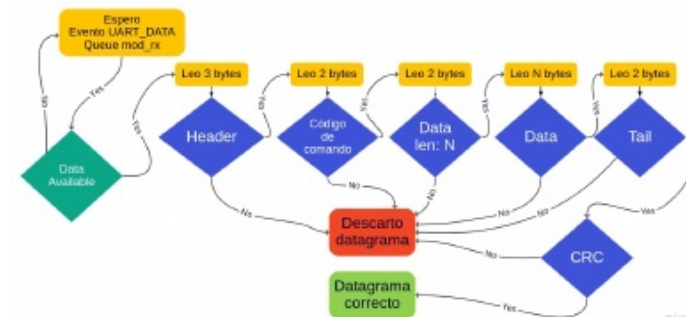


FIGURA 3.17. Secuencia de procesamientos de datos entrantes.

New protocol				
	Inmersion		Withdrawal	
Speed [mm/min]	10		20	
Acceleration [mm/min²]	1000		1000	
Waiting Time [s]	5		10	
Substrate Position	25	Depth	20	Cycles 4

FIGURA 3.18. Pantalla de configuración de programa.

Registro de variables ambientales

En la sección 2.5 se presentó el requerimiento opcional que establece el registro de variables de humedad, presión y temperatura. El interés del cliente se fundamenta en que ciertos experimentos necesitan realizarse a humedad y temperatura controlada. Esta primera implementación solo monitorea las variables y no realiza ningún control de corrección sobre las mismas.

Para el registro de estas variables se incorporó al sistema un sensor BME280. El mismo integra en un solo CI sensores de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa. El fabricante ofrece en sus repositorios [31] ejemplos de implementaciones y una API para utilizar todas las funcionalidades del integrado.

La comunicación entre el sensor y el microcontrolador se realizó a través del protocolo I2C. Se incorporó el módulo de software BOARD I2C que se encarga de inicializar el periférico I2C. También se implementó el módulo API BOSH BME, que trabaja con todas las funcionalidades que ofrece el fabricante en su API. En la figura 3.19 se puede observar el detalle de las capas desarrolladas.

API BOSH BME inicializa una estructura que define los siguientes parámetros:

- Dirección del dispositivo I2C.

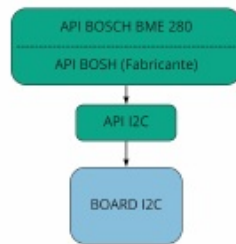


FIGURA 3.19. Módulo API BOSH.

- Función de escritura.
- Función de delay.
- Configuración de modo normal de funcionamiento del sensor.

Los datos registrados por el sensor se visualizan cada cinco minutos en la consola de comandos, como se observa en la figura 3.20.

```

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

tecsci_dipcoater>
I (2507) api_bosh_bme280.c: Temperatura:22.55, Presion:100811.02, Humedad:48.55
  
```

FIGURA 3.20. Registro de datos en consola.

Parámetros de calibración

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

- hardware.h: contiene todas las macros referidas a los pines de conexión del modelo de microcontrolador utilizado.
- os-config.h: contiene las macros de configuración de las tareas y colas de FreeRTOS. Incluye entre otros parámetros el tamaño del stack, la prioridad y el tiempo de ejecución de cada tarea.
- machine.h: contiene las macros relacionadas con la calibración mecánica del equipo.

La macro más importante configurada en el archivo machine.h es MACHINE STEPS PER MILLIMETER, que debe estar perfectamente determinada. En la sección 4.3 se demuestra el procedimiento realizado para obtener su valor. Esta macro define la cantidad de micropasos necesarios para generar el desplazamiento de 1 mm. La misma está completamente relacionada con el paso del tornillo acoplado al eje del motor. Las unidades de posición son expresados en micropasos,

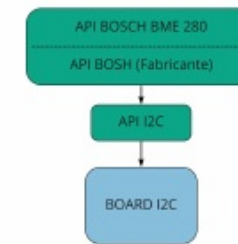


FIGURA 3.19. Módulo API BOSH.

- Función de **lectura**.
- **Función de escritura**.
- Función de delay.
- Configuración de modo normal de funcionamiento del sensor.

Los datos registrados por el sensor se visualizan cada cinco minutos en la consola de comandos, como se observa en la figura 3.20.

```

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

tecsci_dipcoater>
I (2507) api_bosh_bme280.c: Temperatura:22.55, Presion:100811.02, Humedad:48.55
  
```

FIGURA 3.20. Registro de datos en consola.

Parámetros de calibración

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

- hardware.h: contiene todas las macros referidas a los pines de conexión del modelo de microcontrolador utilizado.
- os-config.h: contiene las macros de configuración de las tareas y colas de FreeRTOS. Incluye entre otros parámetros el tamaño del stack, la prioridad y el tiempo de ejecución de cada tarea.
- machine.h: contiene las macros relacionadas con la calibración mecánica del equipo.

La macro más importante configurada en el archivo machine.h es MACHINE STEPS PER MILLIMETER, que debe estar perfectamente determinada. En la sección 4.3 se demuestra el procedimiento realizado para obtener su valor. Esta macro define la cantidad de micropasos necesarios para generar el desplazamiento de 1 mm. La misma está completamente relacionada con el paso del tornillo acoplado al eje del motor. Las unidades de posición son expresados en micropasos,

En la figura 4.4 se observa la ejecución del comando de escritura sobre el registro [0x2D] con valor [0x00 0xFF 0xFF 0x00].

- MOSI: [0x2D + 0x80 = 0xAD][0x00 0xFF 0xFF 0x00].



FIGURA 4.4. Comando de escritura sobre registro [0x2D].

En la figura 4.5 se observa la ejecución nuevamente del comando de lectura sobre el registro [0x2D].

- MOSI: [0x2D][0x00 0xFF 0x00 0x00].
- MISO: [0x11][0x00 0xFF 0x00 0x00].



FIGURA 4.5. Comando de lectura actualizado sobre registro [0x2D].

Se observa entonces que luego de estas operaciones el registro [0x2D] se actualizó correctamente con el valor [0x00 0xFF 0x00 0x00].

Con este ensayo se validó la comunicación SPI entre el microcontrolador y el CI TMC5130 para las operaciones de lectura y escritura de datos.

4.2. Pruebas funcionales del firmware

4.2.1. Tiempo de ejecución de movimientos

El ensayo se realizó para verificar los parámetros que definen el desplazamiento de la muestra, es decir para verificar que las velocidades y aceleraciones que definen movimientos sean similares a las que surgen del cálculo teórico.

En el capítulo 3 se detalló la configuración de la rampa de cuatro puntos que define los movimientos del equipo. Con los valores de aceleración, desaceleración, velocidad y desplazamiento se calculó el tiempo teórico necesario para ejecutar cada ciclo de trabajo.

Para realizar el ensayo, cuyos parámetros se ven en la tabla 4.1, se implementó una aplicación de prueba que realiza el siguiente procedimiento:

En la figura 4.4 se observa la ejecución del comando de escritura sobre el registro [0x2D] con valor [0x00 0xFF 0xFF 0x00].

- MOSI: [0x2D + 0x80 = 0xAD][0x00 0xFF 0xFF 0x00].



FIGURA 4.4. Comando de escritura sobre registro [0x2D].

En la figura 4.5 se observa la ejecución nuevamente del comando de lectura sobre el registro [0x2D].

- MOSI: [0x2D][0x00 0xFF 0x00 0x00].
- MISO: [0x11][0x00 0xFF 0x00 0x00].



FIGURA 4.5. Comando de lectura actualizado sobre registro [0x2D].

Se observa entonces que luego de estas operaciones el registro [0x2D] se actualizó correctamente con el valor [0x00 0xFF 0x00 0x00].

Con este ensayo se validó la comunicación SPI entre el microcontrolador y el CI TMC5130 para las operaciones de lectura y escritura de datos.

4.2. Pruebas funcionales del firmware

4.2.1. Tiempo de ejecución de movimientos

El ensayo se realizó para verificar los parámetros que definen el desplazamiento de la muestra, es decir para verificar que las velocidades y aceleraciones que definen movimientos sean similares a las que surgen del cálculo teórico.

En el capítulo 3 se detalló la configuración de la rampa de cuatro puntos que define los movimientos del equipo. Con los valores de aceleración, desaceleración, velocidad y desplazamiento se calculó el tiempo teórico necesario para ejecutar cada ciclo de trabajo.

Para realizar el ensayo, cuyos parámetros se ven en la tabla 4.1, se implementó una aplicación de prueba que realiza el siguiente procedimiento:

3. Envío de comando STOP.

En la figura 4.8 se observa como se descarta el comando down cuando el equipo se encuentra en funcionamiento.

```

1 (1179177) app_hwit: state.window_running_program_
1 (1179277) vod_coating_process : Proceso Iniciado - Motor Encendido
1 (1179277) vod_coating_handlers: HandlerDownUntil
1 (1179277) vod_coating_handlers: Vel:212000
1 (1179277) vod_coating_handlers: Accel:65000
1 (1179287) vod_coating_handlers: Desplazamiento hasta fluido en pasos:1549920
tecsol_dipcoaster> down
E (1181577) vod_console_commands: Comando DOWN descartado, maquina trabajando
Command returned non-zero error code: 0x1 (ERROR)
tecsol_dipcoaster> | (1185727) vod_coating_handlers: HandlerWait
1 (1187727) vod_coating_handlers: HandlerDownLoop
1 (1187727) vod_coating_handlers: Vel:226120
1 (1187727) vod_coating_handlers: Accel:308187
1 (1189977) vod_coating_handlers: HandlerWaitDown
1 (1189977) vod_coating_handlers: HandlerUpLoop
1 (1189977) vod_coating_handlers: Vel:226120
1 (1189977) vod_coating_handlers: Accel:308187
1 (1191227) vod_coating_handlers: HandlerWaitUp
1 (1192227) vod_coating_handlers: HandlerFinish

```

FIGURA 4.8. Comando DOWN descartado por equipo en funcionamiento.

El único comando de movimiento que no se descarta es el comando stop, que tiene un tratamiento especial a través de una cola propia y siempre se garantiza su ejecución. En la figura 4.9 se observa la finalización del proceso.

```

1 (1250627) vod_coating_process : Proceso Iniciado - Motor Encendido
1 (1250627) vod_coating_handlers: HandlerDownUntil
1 (1250627) vod_coating_handlers: Vel:212000
1 (1250637) vod_coating_handlers: Accel:65000
1 (1250637) vod_coating_handlers: Desplazamiento hasta Fluido en pasos:129160
tecsol_dipcoaster> stop
1 (1252957) vod_console_commands: Comando STOP recibido
tecsol_dipcoaster>

```

FIGURA 4.9. Comando STOP procesado.

4.3. Calibración del equipo

4.3.1. Desplazamiento lineal y micropasos

La razón de este ensayo fue definir y ajustar la constante de desplazamiento que relaciona los micropasos realizados por el motor, con la distancia de desplazamiento del carro. La misma es una constante que está definida por el paso del tornillo.

Para realizar las mediciones se utilizó un comparador digital de la marca Asimeto[32], el cual puede observarse en la figura 4.10. El mismo tiene una resolución de 0.001 mm y permite desplazamientos de 0 a 50 mm.

El ensayo consistió en medir seis desplazamientos sucesivos de 1 mm sobre el carro de manera descendente y luego de manera ascendente. Es importante porque

3. Envío de comando STOP.

```

1 (1179177) app_hwit: state.window_running_program_
1 (1179277) vod_coating_process : Proceso Iniciado - Motor Encendido
1 (1179277) vod_coating_handlers: HandlerDownUntil
1 (1179277) vod_coating_handlers: Vel:212000
1 (1179277) vod_coating_handlers: Accel:65000
1 (1179287) vod_coating_handlers: Desplazamiento hasta fluido en pasos:1549920
tecsol_dipcoaster> down
E (1181577) vod_console_commands: Comando DOWN descartado, maquina trabajando
Command returned non-zero error code: 0x1 (ERROR)
tecsol_dipcoaster> | (1185727) vod_coating_handlers: HandlerWait
1 (1187727) vod_coating_handlers: HandlerDownLoop
1 (1187727) vod_coating_handlers: Vel:226120
1 (1187727) vod_coating_handlers: Accel:308187
1 (1189977) vod_coating_handlers: HandlerWaitDown
1 (1189977) vod_coating_handlers: HandlerUpLoop
1 (1189977) vod_coating_handlers: Vel:226120
1 (1189977) vod_coating_handlers: Accel:308187
1 (1191227) vod_coating_handlers: HandlerWaitUp
1 (1192227) vod_coating_handlers: HandlerFinish

```

FIGURA 4.8. Comando DOWN descartado por equipo en funcionamiento.

El único comando de movimiento que no se descarta es el comando stop, que tiene un tratamiento especial a través de una cola propia y siempre se garantiza su ejecución. En la figura 4.9 se observa la finalización del proceso.

```

1 (1250627) vod_coating_process : Proceso Iniciado - Motor Encendido
1 (1250627) vod_coating_handlers: HandlerDownUntil
1 (1250627) vod_coating_handlers: Vel:212000
1 (1250637) vod_coating_handlers: Accel:65000
1 (1250637) vod_coating_handlers: Desplazamiento hasta Fluido en pasos:129160
tecsol_dipcoaster> stop
1 (1252957) vod_console_commands: Comando STOP recibido
tecsol_dipcoaster>

```

FIGURA 4.9. Comando STOP procesado.

4.3. Calibración del equipo

4.3.1. Desplazamiento lineal y micropasos

La razón de este ensayo fue definir y ajustar la constante de desplazamiento que relaciona los micropasos realizados por el motor, con la distancia de desplazamiento del carro. La misma es una constante que está definida por el paso del tornillo.

Para realizar las mediciones se utilizó un comparador digital de la marca Asimeto[32], el cual puede observarse en la figura 4.10. El mismo tiene una resolución de 0.001 mm y permite desplazamientos de 0 a 50 mm.

El ensayo consistió en medir seis desplazamientos sucesivos de 1 mm sobre el carro de manera descendente y luego de manera ascendente. Es importante porque permite corregir la unidad de conversión de micropasos a milímetros que utiliza el CI TMC5130 para realizar todos los movimientos. En la subsección 3.2.2 se



FIGURA 4.10. Comparador digital Asimeto.

permite corregir la unidad de conversión de micropasos a milímetros que utiliza el CI TMC5130 para realizar todos los movimientos. En la subsección 3.2.2 se mencionó la macro *MACHINE STEPS PER MILLIMETER* definida en el archivo *hardware.h* que surgió de estas mediciones.

En la figura 4.11 se observa el banco de medición donde se visualiza el comparador Asimeto apoyado sobre una base metálica independiente, con la punta del mismo en contacto directo con el carro de desplazamiento.

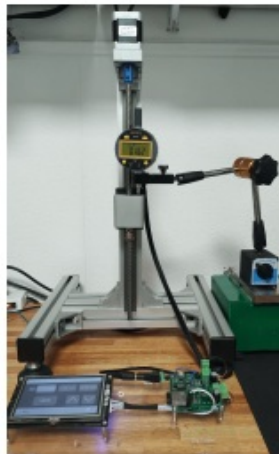


FIGURA 4.11. Ensayo de desplazamiento lineal.

Para iniciar el ensayo se presiona el botón *origin* del comparador para poner en cero la medida, la sensibilidad del mismo es tan grande que es difícil lograr 0,000 mm debido a la acción misma de apretar el botón. Luego se realizan movimientos



FIGURA 4.10. Comparador digital Asimeto.

mencionó la macro *MACHINE STEPS PER MILLIMETER* definida en el archivo *hardware.h* que surgió de estas mediciones.

En la figura 4.11 se observa el banco de medición donde se visualiza el comparador Asimeto apoyado sobre una base metálica independiente, con la punta del mismo en contacto directo con el carro de desplazamiento.



FIGURA 4.11. Ensayo de desplazamiento lineal.

Para iniciar el ensayo se presiona el botón *origin* del comparador para poner en cero la medida, la sensibilidad del mismo es tan grande que es difícil lograr 0,000 mm debido a la acción misma de apretar el botón. Luego se realizan movimientos descendentes de 1 mm y se registran los datos. En la tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos.

descendentes de 1 mm y se registran los datos. En la tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos.

TABLA 4.2. Ensayo de desplazamiento lineal descendente

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

De igual manera se confecciona la tabla 4.3 para los movimientos ascendentes.

TABLA 4.3. Ensayo de desplazamiento lineal ascendente

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

Para corregir el valor de micropasos por milímetros de desplazamiento se utilizó el siguiente procedimiento:

1. Calcular el promedio de los 6 errores relativos ascendentes y descendentes.
2. Ajustar el valor inicial de micropasos con los respectivos errores.
3. Calcular el promedio entre el valor corregido ascendente y el valor corregido descendente.

Inicialmente al comenzar el ensayo la macro *MACHINE STEPS PER MILLIMETER* estaba definida con un valor de 12737 micropasos por milímetro, luego de sucesivas correcciones la macro quedó definida en 12932 micropasos por milímetro. Este ensayo se repitió cinco veces hasta llegar a los valores presentados en las tablas, en donde se observó que el porcentaje promedio de los errores relativos fue inferior al 2.5 %.

4.4. Caso de prueba

4.4.1. Prueba de campo con personal capacitado

El ensayo final se llevó a cabo junto a personal capacitado del Instituto de Nanosistemas e implicó un proceso completo de producción de thin film.

Para el experimento se utilizó un wafer de silicio como sustrato y dióxido de titanio disuelto en etanol como solución para formar un *film* de nanopartículas de

TABLA 4.2. Ensayo de desplazamiento lineal descendente

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

De igual manera se confecciona la tabla 4.3 para los movimientos ascendentes.

TABLA 4.3. Ensayo de desplazamiento lineal ascendente

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

Para corregir el valor de micropasos por milímetros de desplazamiento se utilizó el siguiente procedimiento:

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

Inicialmente al comenzar el ensayo la macro *MACHINE STEPS PER MILLIMETER* estaba definida con un valor de 12737 micropasos por milímetro, luego de sucesivas correcciones la macro quedó definida en 12932 micropasos por milímetro. Este ensayo se repitió cinco veces hasta llegar a los valores presentados en las tablas, en donde se observó que el porcentaje promedio de los errores relativos fue inferior al 2.5 %.

4.4. Caso de prueba

4.4.1. Prueba de campo con personal capacitado

El ensayo final se llevó a cabo junto a personal capacitado del Instituto de Nanosistemas e implicó un proceso completo de producción de thin film.

Para el experimento se utilizó un wafer de silicio como sustrato y dióxido de titanio disuelto en etanol como solución para formar un *film* de nanopartículas de titanio. La prueba se realizó en el laboratorio Nanoatelier del Instituto de Nanosistemas, se observa en la figura 4.12 el equipo instalado.

titanio. La prueba se realizó en el laboratorio Nanoatelier del Instituto de Nanosistemas, se observa en la figura 4.12 el equipo instalado.

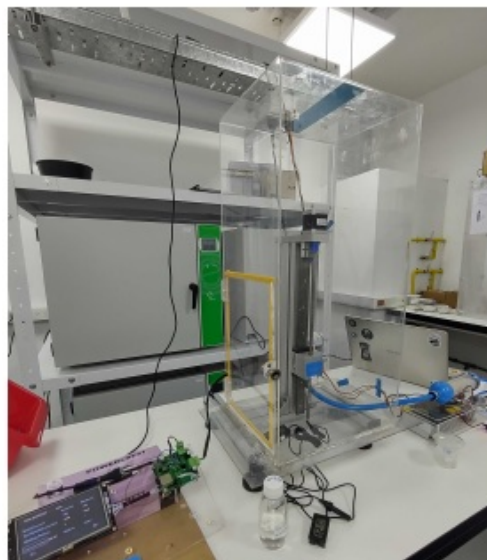


FIGURA 4.12. Ensayo completo en laboratorio.

Para realizar el experimento se siguió la siguiente secuencia:

1. Se agregó sobre el equipo una cámara de acrílico con suministro de aire comprimido y filtro de sílica gel, utilizado para bajar la humedad del aire.
2. Se colocó el wafer de silicio sobre el carro y la solución dentro de una caja plástica debajo, como se observa en la figura 4.13.
3. Se encendió el equipo y el usuario configuró los parámetros del proceso a pie de máquina sobre la pantalla táctil.
4. En paralelo se controló la humedad de la cámara sobre la consola serial de un ordenador conectado al equipo.
5. Se esperó hasta lograr una humedad dentro de la cámara de 20 %.
6. Se inició el proceso de dip coating.
7. Al finalizar se extrajo la muestra.

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



FIGURA 4.12. Ensayo completo en laboratorio.

Para realizar el experimento se siguió la siguiente secuencia:

1. Se agregó sobre el equipo una cámara de acrílico con suministro de aire comprimido y filtro de sílica gel, utilizado para bajar la humedad del aire.
2. Se colocó el wafer de silicio sobre el carro y la solución dentro de una caja plástica debajo, como se observa en la figura 4.13.
3. Se encendió el equipo y el usuario configuró los parámetros del proceso a pie de máquina sobre la pantalla táctil.
4. En paralelo se controló la humedad de la cámara sobre la consola serial de un ordenador conectado al equipo.
5. Se esperó hasta lograr una humedad dentro de la cámara de 20 %.
6. Se inició el proceso de dip coating.
7. Al finalizar se extrajo la muestra.

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

4.5. Comparación con el estado del arte

En la tabla 4.4 se observan las características del equipo diseñado y fabricado contra los equipos comerciales mostrados en la sección 1.3.

TABLA 4.4. Comparación de especificaciones técnicas.

Equipo	Velocidad (mm/min)	Aceleración (m/min ²)	Interface	Open Source Hardware
Bio Single	1 - 1000	no	PC	no
Bio Multiplie	0.1 - 108	no	PC	no
Kibron LayerX	0.06 - 300	no	PC	no
Bungard	30 - 10000	no	Display LCD	no
Ossila	0.6 - 3000	no	PC	no
Holmarc	1.08 - 540	no	PC	no
Este Equipo	1-800	1 - 2100	Touch-PC	si

Se destacan aspectos únicos que diferencian a este equipo sobre el resto:

1. Permite realizar experimentos con variaciones del parámetro de aceleración.
2. Se configura fácilmente a través de una pantalla táctil o desde un ordenador.
3. Adhiere a la filosofía del hardware libre.

4.5. Comparación con el estado del arte

En la tabla 4.4 se observan las características del equipo diseñado y fabricado contra los equipos comerciales mostrados en la sección 1.3.

TABLA 4.4. Comparación de especificaciones técnicas.

Equipo	Recorrido (mm)	Velocidad (mm/min)	Aceleración (m/min ²)	Interface	Open Source Hardware
Bio Single	300	1 - 1000	no	PC	no
Bio Multiplie	70	0.1 - 108	no	PC	no
Kibron LayerX	134	0.06 - 300	no	PC	no
Bungard	600	30 - 10000	no	Display LCD	no
Ossila	100	0.6 - 3000	no	PC	no
Holmarc	100	1.08 - 540	no	PC	no
Este Equipo	300	1-800	si	Touch-PC	si

Se destacan aspectos únicos que diferencian a este equipo sobre el resto:

1. Permite realizar experimentos con variaciones del parámetro de aceleración.
2. Se configura fácilmente a través de una pantalla táctil o desde un ordenador.
3. Adhiere a la filosofía del hardware libre.