



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Desarrollo del sistema de control de una máquina de corte y grabado láser de dos grados de libertad accionada mediante motores paso a paso

Two DOF Laser Engraving and Cutting Machine Control System Development driven by stepper motors

Autor

Enrique Usón Pereda

Director

Javier Esteban Escaño

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia
2020



**Escuela Universitaria
Politécnica** - La Almunia
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

Desarrollo del sistema de control de una
máquina de corte y grabado láser de dos
grados de libertad accionada mediante
motores paso a paso

Two DOF Laser Engraving and Cutting
Machine Control System Development
driven by stepper motors

424.20.55

Autor: Enrique Usón Pereda

Director: Javier Esteban Escaño

Fecha: 23 / 09 / 2020

INDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. RESUMEN	1
1.1.1. <i>Palabras clave</i>	1
1.2. ABSTRACT	2
1.2.1. <i>Keywords</i>	2
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA ELEGIDO	3
1.4. OBJETIVOS	5
2. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA INSTALACIÓN	6
2.1. DESCRIPCIÓN	6
2.1.1. <i>Máquina de corte y grabado láser</i>	6
2.1.1.1. Descripción de la máquina	7
2.1.1.2. Componentes de la máquina	8
2.1.1.2.1. Sistema del láser	8
2.1.1.2.2. Sistema de control de posición	9
2.1.2. <i>Diagrama de bloques de la instalación</i>	10
2.1.3. <i>Control por ordenador</i>	10
2.1.3.1. Programa informático	11
2.1.3.1.1. Control del láser	11
2.1.3.1.2. Control de posición	12
2.1.3.1.3. Introducción de instrucciones	13
2.2. INFORMACIÓN TÉCNICA DE LOS COMPONENTES	14
2.2.1. <i>Fuente de alimentación</i>	14
2.2.2. <i>Motores paso a paso</i>	16
2.2.3. <i>Reductor</i>	18
3. MARCO TEÓRICO	20
3.1. FUNDAMENTOS DEL CORTE Y GRABADO LÁSER	20
3.1.1. <i>Definición de láser</i>	20
3.1.2. <i>Funcionamiento de un láser</i>	21
3.1.3. <i>Principios físicos de un láser</i>	22
3.1.4. <i>Características de la luz laser</i>	23

INDICES

3.1.5.	<i>Procesamiento de materiales con láser</i>	24
3.1.5.1.	Procesos de ablación láser	25
3.1.5.1.1.	Corte láser	25
3.1.5.1.2.	Grabado láser	25
3.1.5.1.3.	Factores de la ablación láser	26
3.1.5.2.	Marcado láser	26
3.2.	MOTORES PASO A PASO	27
3.2.1.	<i>Definición de motores paso a paso</i>	27
3.2.2.	<i>Principio de funcionamiento</i>	28
3.2.3.	<i>Estructura interna</i>	29
3.2.3.1.	Estator	29
3.2.3.2.	Rotor	30
3.2.3.2.1.	Rotor de imán permanente	30
3.2.3.2.2.	Rotor de reluctancia variable	30
3.2.3.2.3.	Rotor híbrido	30
3.2.4.	<i>Control de un motor paso a paso</i>	31
3.2.5.	<i>Tipos de motores paso a paso</i>	31
3.2.5.1.	Unipolares	32
3.2.5.2.	Bipolares	33
3.2.6.	<i>Técnicas de control</i>	34
3.2.6.1.	Wave mode	34
3.2.6.2.	Full-step mode	35
3.2.6.3.	Half-step mode	36
3.2.6.4.	Microstepping	37
3.2.7.	<i>Desventajas de los motores paso a paso</i>	38
3.3.	ENCODER INCREMENTAL	39
4.	DISEÑO	41
4.1.	ESTUDIO SOBRE LA VIABILIDAD DE LOS MOTORES PASO A PASO	42
4.1.1.	<i>Influjo de la reductora</i>	43
4.1.2.	<i>Influjo del driver</i>	45
4.1.3.	<i>Resultado del estudio</i>	46
4.2.	PROPUESTA DE MEJORA	47
4.2.1.	<i>Análisis de la reductora</i>	47
4.2.2.	<i>Cambio del driver</i>	48
4.2.3.	<i>Características del encoder</i>	48
4.2.4.	<i>Acoplamientos</i>	49



INDICES

4.2.5.	<i>Modificaciones electrónicas</i>	50
4.2.6.	<i>Diagrama de bloques de la propuesta de mejora</i>	51
4.3.	DESARROLLO DE LA PROPUESTA DE MEJORA	52
4.3.1.	<i>Implementación del encoder</i>	52
4.3.1.1.	Encoder escogido	52
4.3.1.1.1.	Cableado del encoder	52
4.3.1.1.2.	Dimensiones del encoder	53
4.3.1.2.	Diseño del soporte del motor	54
4.3.1.2.1.	Orden de montaje	55
4.3.1.2.2.	Ampliación del eje	55
4.3.1.2.3.	Anclaje del encoder	56
4.3.2.	<i>Diseño de la electrónica de control</i>	57
4.3.2.1.	Elección de los componentes electrónicos	57
4.3.2.1.1.	Driver	57
4.3.2.1.2.	Módulo de microcontrolador	59
4.3.2.2.	Diseño de la PCB	60
4.3.2.2.1.	Circuito del ESP32	62
4.3.2.2.2.	Circuito del DRV8825	63
4.3.2.2.3.	Circuito del DRV8874	64
4.3.2.2.4.	Esquema electrónico completo	64
4.3.2.2.5.	Placa de circuito impreso	66
5.	CONCLUSIONES	67
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Fotografía de la máquina	6
Ilustración 2. Representación esquemática de la máquina	7
Ilustración 3. Representación esquemática del movimiento.....	8
Ilustración 4. Diagrama de bloques de la instalación	10
Ilustración 5. Fotografía de la fuente de alimentación	14
Ilustración 6. Pines de la fuente de alimentación	15
Ilustración 7. Fotografía del motor paso a paso.....	16
Ilustración 8. Dimensiones del motor.....	17
Ilustración 9. Cableado y funcionamiento del motor.....	17
Ilustración 10. Fotografía de la reductora	18
Ilustración 11. Comparación de colores de luz por longitud de onda	20
Ilustración 12. Representación de ondas de un rayo láser en fase.....	20
Ilustración 13. Funcionamiento de un láser	21
Ilustración 14. Comparación entre emisión espontánea y estimulada	22
Ilustración 15. Comparación entre luz coherente e incoherente	23
Ilustración 16. Direccionalidad de la luz láser.....	23
Ilustración 17. Clasificación de procesos láser.....	24
Ilustración 18. Corte láser	25
Ilustración 19. Grabado láser	25
Ilustración 20. Marcado láser	26
Ilustración 21. Estructura motor paso a paso.....	28
Ilustración 22. Funcionamiento de un motor paso a paso.....	28

Ilustración 23. Fases de un motor paso a paso.....	29
Ilustración 24. Polos de un motor paso a paso	29
Ilustración 25. Rotor de imán permanente.....	30
Ilustración 26. Rotor híbrido.....	30
Ilustración 27. Control de un motor paso a paso	31
Ilustración 28. Circuito de control motor unipolar	32
Ilustración 29. Puente en H.....	33
Ilustración 30. Wave mode ondas	34
Ilustración 31. Wave mode pasos.....	34
Ilustración 32. Full-step mode ondas	35
Ilustración 33. Full-step mode pasos	35
Ilustración 34. Half-step mode ondas	36
Ilustración 35. Half-step mode pasos.....	36
Ilustración 36. Microstepping ondas	37
Ilustración 37. Microstepping ejemplo micropasos	37
Ilustración 38. Encoder incremental	39
Ilustración 39. Disco óptico	40
Ilustración 40. Señales incrementales.....	40
Ilustración 41. Diagrama de bloques de la propuesta de mejora	51
Ilustración 42. Encoder Hohner SERIE 77.....	52
Ilustración 43. Soporte del motor.....	54
Ilustración 44. Ampliación del eje.....	55
Ilustración 45. Anclaje del encoder.....	56
Ilustración 46. DRV8825.....	57
Ilustración 47. DRV8874.....	58
Ilustración 48. Diagrama de bloques ESP32-WROVER-E	59
Ilustración 49. Circuito ESP32	62

INDICES

Ilustración 50. Circuito DRV8825	63
Ilustración 51. Circuito DRV8874	64
Ilustración 52. Esquema electrónico completo.....	65
Ilustración 53. Placa de circuito impreso	66
Ilustración 54. Detalle de las pistas de la parte frontal de la placa	66
Ilustración 55. Detalle de las pistas de la parte trasera de la placa.....	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplo de secuencia de instrucciones	13
Tabla 2. Características de la fuente de alimentación	15
Tabla 3. Conectores de la fuente de alimentación	15
Tabla 4. Motores SANMOTION F2 Bipolares de 86mm de diámetro.....	17
Tabla 5. Datos técnicos de la reductora.....	19
Tabla 6. Microstepping ejemplo valores.....	38
Tabla 7. Conexión del encoder.....	53
Tabla 8. Conector JST de 4 pines para un motor paso a paso	60
Tabla 9. Conector JST de 5 pines para un encoder.....	61
Tabla 10. Conector JST de 6 pines para la fuente de alimentación.....	61
Tabla 11. Configuración del DRV8825	63

1. INTRODUCCIÓN

1.1. RESUMEN

Se pretende realizar la mejora del sistema de control de posición de una máquina de corte y grabado láser de forma que pueda alcanzar una precisión de una micra en la posición del rayo láser. La posición del rayo está controlada por dos motores paso a paso que permiten su movimiento con dos grados de libertad sobre la superficie de corte.

Para alcanzar este objetivo, se necesita determinar si es posible alcanzar esta precisión empleando drivers de control de motores que empleen la técnica de micropasos. En caso de no ser posible será necesario plantear un motor alternativo.

Una vez concretado el motor, se ha de diseñar la parte mecánica del sistema de control de posición, seleccionando elementos comerciales y desarrollando elementos estructurales que permitan su incorporación. Adicionalmente, se añaden encoders incrementales para establecer un sistema de realimentación de posición y mejorar el control de la máquina.

Finalmente, es necesario diseñar la circuitería electrónica necesaria en forma de placa de circuito impreso (PCB) que realice el control de los motores. De este modo, se aglutinan los drivers y otros componentes electrónicos adaptados a las características de funcionamiento de la máquina modificada.

1.1.1. Palabras clave

- Corte y grabado láser
- Motores paso a paso
- Control de micropasos
- Encoder incremental
- Placa de circuito impreso

1.2. ABSTRACT

It is intended to improve the position control system of a laser cutting and engraving machine so that it can achieve an accuracy of a micron in the position of the laser beam. The position of the beam is controlled by two stepper motors that allow its movement with two degrees of freedom on the cutting surface.

To achieve this goal, it is necessary to determine whether this accuracy can be achieved using motor control drivers that employ the microstep technique. If this is not possible, it will be necessary to propose an alternative engine.

Once the engine has been specified, the mechanical part of the position control system must be designed, selecting commercial elements and developing structural elements that allow its incorporation. Additionally, incremental encoders are added to establish a position feedback system and improve machine control.

Finally, it is necessary to design the necessary electronic circuitry in the form of a printed circuit board (PCB) that performs motor control. In this way, the drivers and other electronic components adapted to the operating characteristics of the modified machine are bind together.

1.2.1. Keywords

- Laser cutting and engraving
- Stepper motors
- Microstepping control
- Incremental encoder
- Printed circuit board

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA ELEGIDO

El corte por láser es una técnica que permite realizar de forma automatizada cortes de altísima precisión con un acabado excelente. Puede ser empleado sobre una amplia variedad de materiales con características muy variables. Las aplicaciones de esta técnica no se limitan únicamente a realizar secciones sobre una superficie: mediante el control de la intensidad del haz de luz láser se puede controlar la profundidad, realizándose un desgaste en el material, pudiendo grabarse texto o distintas formas sobre el mismo.

En uno de los laboratorios del Departamento de Física Aplicada de las Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza hay una máquina de corte por láser cuya utilidad está orientada a realizar corte y grabado de figuras sobre láminas de vidrio. Sin embargo, debido a su antigüedad y a que su sistema de control está obsoleto, su uso se considera poco práctico. Debido a todo esto, la máquina se encuentra en desuso empleándose de forma puntual para pequeñas tareas.

La necesidad de este documento surge del interés del personal del Departamento de Física Aplicada por actualizar la máquina en cuestión para que se ajuste a las necesidades de uso del laboratorio. De tal forma que pueda volver a ser usada con normalidad con una funcionalidad mejorada.

A pesar de su antigüedad, la máquina se encuentra en un buen estado general, sin averías ni desperfectos de gravedad. Por este motivo, se pretende que las modificaciones que se vayan a realizar afecten lo menos posible a la estructura de la máquina y a sus componentes. Esto con la finalidad adicional de que, en el caso de que se lleven a cabo las modificaciones, el gasto económico sea lo menor posible.

Las mejoras a la funcionalidad que se desean incorporar a la máquina consisten, en primer lugar, en conseguir una precisión en la posición del haz de luz láser de una micra o superior. En segundo lugar, adaptar el programa de control actual a las nuevas características de funcionamiento mejorando la facilidad de uso.

Las mejoras planteadas hacen referencia únicamente al sistema de control de posición, por lo que es aquí donde habrá que realizar todas las modificaciones. Consecuentemente, podrá conservarse tanto la estructura como el resto de los componentes de la máquina, incluyendo el láser de CO₂ y la fuente de alimentación.

Introducción

El sistema para controlar la posición del haz láser de la máquina está estructurado de la siguiente forma: una parte mecánica, cuyos componentes fundamentales son dos motores paso a paso que controlan el desplazamiento, cada uno en la dirección de uno de los ejes de la superficie de corte (dando lugar a un desplazamiento de dos grados de libertad); la electrónica de control de los motores; y el programa informático.

Una característica destacable del sistema de control es que la instalación carece de un sistema de realimentación de posición como son codificadores rotativos de posición o encoders que permitan conocer la posición del eje del motor en cada instante.

Este aspecto es de gran relevancia debido a que, para mejorar el sistema de control, es necesario llevar a cabo un control adecuado y preciso de los motores. Al tratarse de motores paso a paso, gran parte de la problemática a solucionar es la indeterminación de la posición. Esto es que, al recibir un impulso eléctrico para el avance del motor, puede que no avance o incluso que se dé un retroceso. Esto es un fenómeno completamente indeseable, pudiendo suponer un defecto en el acabado o la obtención de una figura distinta a la deseada al realizar el corte o grabado.

Otro aspecto fundamental para poder obtener la precisión deseada en la posición es conocer qué precisión se puede conseguir con los motores paso a paso disponibles. Esto viene determinado por el paso del motor, es decir, cuánto es el ángulo de giro del eje para un paso del motor.

Aunque es posible aumentar la precisión del sistema por distintos métodos conservando los motores, cabe la posibilidad de que sea imposible alcanzar la precisión deseada. Por lo tanto, gran parte del trabajo para alcanzar una solución satisfactoria a la mejora del sistema de control consiste en estudiar la viabilidad de los motores paso a paso. En caso de no serlo, será necesario estudiar alternativas como emplear motores síncronos o servomotores, destacados por su amplio uso en aplicaciones de robótica.

Una vez se haya determinado cómo es la parte mecánica del nuevo sistema de control para cumplir las especificaciones indicadas; sus características, funcionamiento y componentes; habrá que plantear las modificaciones necesarias sobre el sistema para poder incorporar los componentes necesarios. Finalmente, será necesario desarrollar las mejoras a realizar de forma que se concreten en un diseño mecánico y electrónico. Consecuentemente, el diseño de la nueva electrónica de control debe ser tal que se ajuste a las nuevas características de funcionamiento habrá que diseñar una nueva electrónica de control que se ajuste a las nuevas características, incorporando un sistema de realimentación de posición y mejorando la facilidad de uso.

1.4. OBJETIVOS

El objetivo fundamental del trabajo consiste en plantear de forma teórica una propuesta de mejora de la máquina de corte y grabado láser localizada en el laboratorio del Departamento de Física Aplicada de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza, mediante el diseño de un sistema de control de posición alternativo al actual.

De este objetivo fundamental derivan otros objetivos secundarios, pero igualmente necesarios para la resolución del problema. Dichos objetivos son:

- Identificar las partes actuales de la máquina determinado los distintos componentes que la forman y qué relaciones hay entre ellos para poder caracterizar con precisión el funcionamiento de la máquina.
- Recabar información sobre los distintos componentes para poder analizar sus características y comprender como afectan al funcionamiento global del sistema.
- Estudiar la viabilidad de los motores paso a paso para obtener la precisión de una micra en la posición del láser.
- Diseñar la parte mecánica del sistema de control de posición para cumplir las características requeridas, mediante la elección de componentes comerciales.
- Estudiar la implementación de codificadores rotativos de posición (encoders).
- Diseñar los elementos estructurales necesarios para poder incorporar los nuevos componentes y desempeñar las modificaciones necesarias sobre la máquina.
- Desarrollar placas de circuito impreso (PCB) de diseño propio que constituyan la electrónica de control de los motores, adaptada a los nuevos requerimientos del sistema, mediante la elección de los componentes electrónicos, la creación de esquemas de circuitos electrónicos y la elaboración de planos.

Para lograr dichos objetivos, es necesario realizar previamente una investigación del marco teórico de los posibles aspectos a tener en cuenta. Esto, para poder entender los principios en que se basa una máquina de corte y grabado por láser de CO₂, obtener los conocimientos necesarios para comprender el funcionamiento de una máquina de estas características y poder plantear una posible solución.

Descripción del estado actual de la instalación

2. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA INSTALACIÓN

Toda la información que se presenta a continuación se ha obtenido al haber podido observar la máquina de corte y grabado láser en persona una única vez. La máquina no se pudo observar en funcionamiento, pero en el contexto de esta visita, se realizaron varias fotos de algunos componentes de la máquina (disponibles en el Anexo 1). Dichas fotos, han permitido determinar el modelo concreto de algunos de dichos componentes y la consecuente obtención de información técnica sobre los mismos. Además de esto, pudo realizarse una copia del programa informático realizado por el personal de la universidad para realizar el control de la máquina. A pesar de esto, hay algunos detalles de la máquina que se desconocen, y algunos componentes de los que no se dispone foto ni modelo concreto; habiendo sido imposible obtener dicha información.

2.1. DESCRIPCIÓN

La instalación actual está formada por la máquina de corte y grabado láser y por un ordenador portátil con sistema operativo Windows XP que actúa como terminal de control de la máquina.

2.1.1. Máquina de corte y grabado láser

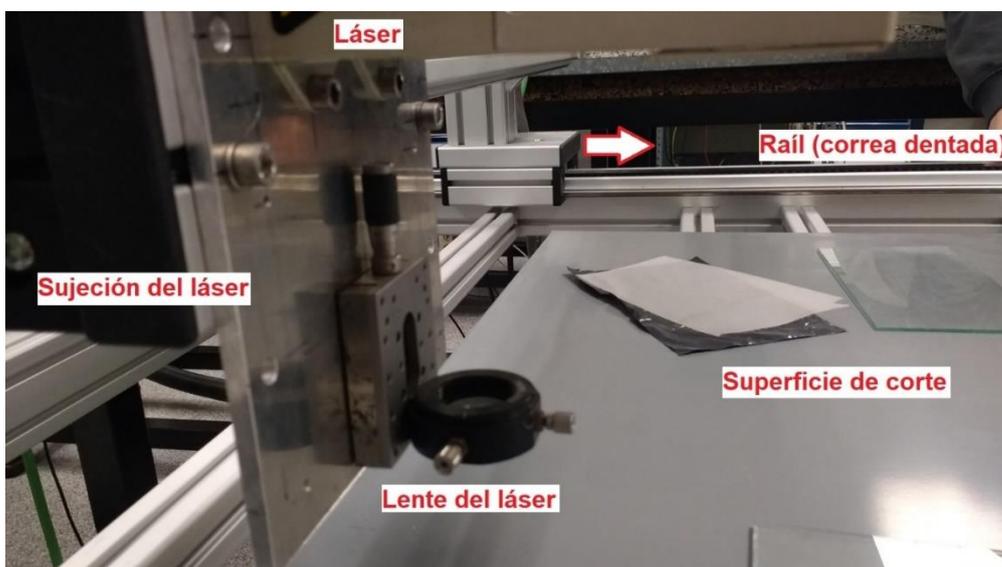


Ilustración 1. Fotografía de la máquina

2.1.1.1. Descripción de la máquina

La máquina está formada por una estructura metálica en la que se encuentran alojados todos sus componentes. Dicha estructura consta de una plataforma paralela al suelo similar a una mesa cuya superficie superior constituye la superficie de corte; es decir, la superficie sobre la que se sitúan los elementos a grabar y cortar.

Acoplada sobre la estructura anterior, hay una segunda estructura metálica de menor tamaño con forma de pórtico que sustenta el láser de CO₂, de forma que éste se encuentra apuntando hacia abajo. Es decir, se encuentra sustentado sobre la superficie de corte apuntando perpendicularmente a la misma. Sin embargo, la posición del láser respecto a la superficie de corte no es fija.

La estructura de la superficie de corte consta en sus laterales unos raíles por los que circula una correa dentada. La estructura del láser está acoplada a estos raíles, de forma que el avance o retroceso de la correa hace que el pórtico también se desplace, produciéndose el movimiento del láser en la misma dirección

En el larguero del pórtico hay otro raíl con su respectiva correa dentada, de forma que su movimiento supone el desplazamiento del láser en la dirección perpendicular al movimiento anterior.

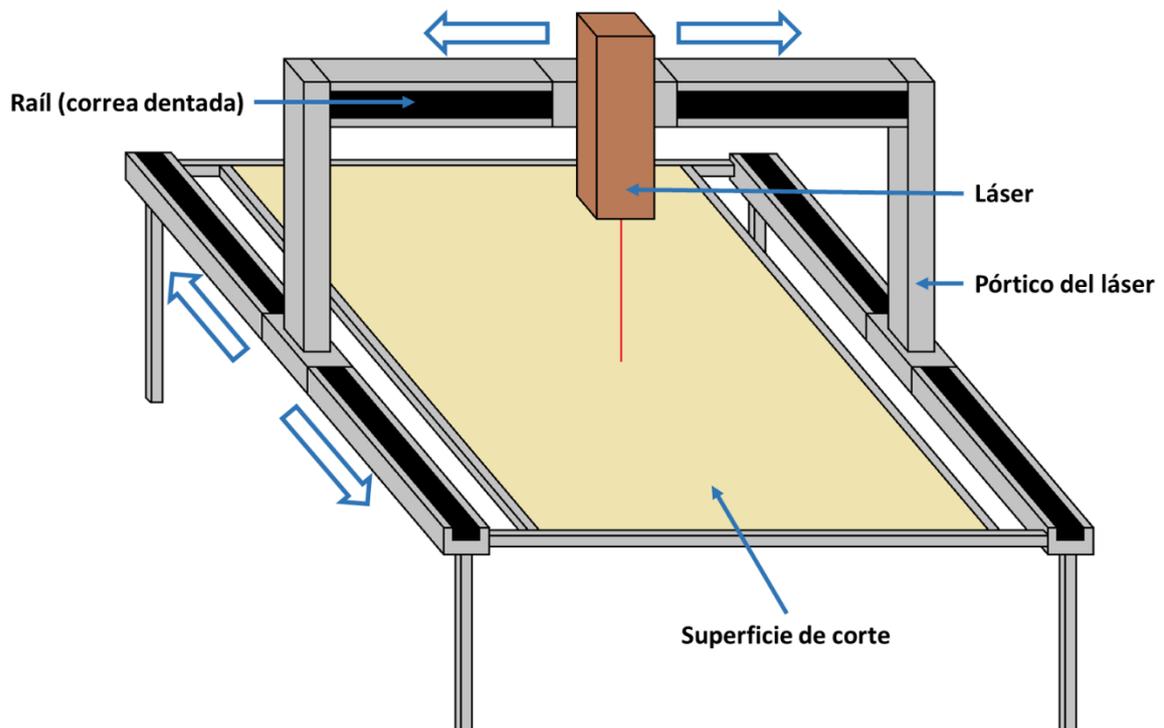


Ilustración 2. Representación esquemática de la máquina

Descripción del estado actual de la instalación

El avance o retroceso de dichas correas dentadas se realiza mediante el accionamiento de dos motores paso a paso (uno para cada dirección de desplazamiento). Consecuentemente, al accionar estos motores, se modifica la posición relativa del láser respecto a la superficie de corte.

Al accionar los motores se mueve el láser con dos grados de libertad, haciendo que el haz de luz láser se desplace sobre la superficie de corte. Controlando el giro de los motores es posible controlar la trayectoria del haz de luz láser, pudiéndose lograr cortes y grabados de distintas formas según la trayectoria seguida.

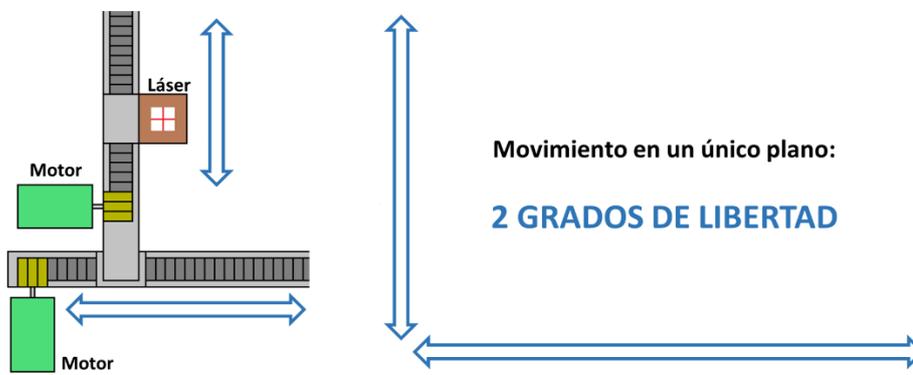


Ilustración 3. Representación esquemática del movimiento

2.1.1.2. Componentes de la máquina

Los componentes de la máquina se pueden aglutinar en dos subsistemas según su utilidad para el funcionamiento global de la máquina: el láser y el sistema de control de posición.

2.1.1.2.1. Sistema del láser

El sistema del láser está formado por el láser de CO₂ y un aparato que sirve para el control y la alimentación del láser.

El sistema de control y alimentación está conectado directamente a la red eléctrica, adaptando la corriente para que pueda ser empleada por el láser; haciendo las veces de fuente de alimentación del láser de CO₂.

Dicho aparato también permite controlar el funcionamiento del láser, siendo posible variar ciertas características del haz de luz para lograr distintos efectos en el corte o grabado según el resultado buscado.

El aparato recibe las instrucciones para controlar el láser del ordenador por comunicación por puerto serie. Es decir, mediante el sistema de control y alimentación del láser es posible controlar el láser de CO₂ desde el ordenador.

2.1.1.2.2. Sistema de control de posición

Los componentes de la máquina que conforma el sistema de control de posición son los siguientes:

- Fuente de alimentación de los motores
- Placas controladoras de los motores
- Motores paso a paso
- Reductoras

Como se ha explicado anteriormente, la máquina consta de dos motores paso a paso empleados para accionar los sistemas de engranaje-correa dentada. Ambos motores son del mismo modelo y llevan acoplados una reductora cada uno. Al igual que sucede con los motores, las reductoras son idénticas.

Cada motor está conectado a una placa de circuito impreso (PCB) que contienen la electrónica necesaria para controlar los motores. Se desconoce el modelo de las placas, pero ambas son idénticas y consisten en un circuito tipo driver para el control de los motores.

La fuente de alimentación está conectada directamente a la red eléctrica y adapta la corriente para que pueda ser empleada por los motores. La fuente no alimenta a los motores directamente, sino que alimenta a la placa controladora y es el propio driver el que alimenta a los motores.

Las instrucciones para el control de los motores son transmitidas desde el ordenador a las dos placas controladoras de los motores. Para la comunicación entre ordenador y drivers, el sistema consta de un dispositivo electrónico desconocido que recibe la información por el puerto serie del ordenador y la transmite a los controladores de los motores por medio de señales digitales. Dada la naturaleza de esta comunicación, se intuye que el dispositivo realiza la función de interfaz entre ordenador y drivers que desempeñaría un microcontrolador en una aplicación similar; por este motivo, cada vez que se haga una referencia a este dispositivo se hará por el nombre "módulo de control".

Debido a las características de este sistema, es posible controlar los motores paso a paso desde el ordenador. Controlando el giro de los motores se controla la posición del láser de CO₂. Sin embargo, se ha de tener en cuenta que la máquina carece de un sistema de realimentación de posición (no hay encoders entre los componentes), por lo que no se puede determinar la posición de los ejes de los motores en cada momento, ni la posición del láser desde el ordenador.

Descripción del estado actual de la instalación

2.1.2. Diagrama de bloques de la instalación

Habiéndose analizado cada uno de los componentes de la instalación y teniendo una idea general de la finalidad que desempeña cada uno, es posible establecer las relaciones existentes entre ellos. Dichas relaciones aparecen representadas mediante el siguiente diagrama de bloques (disponible en el Anexo 2):

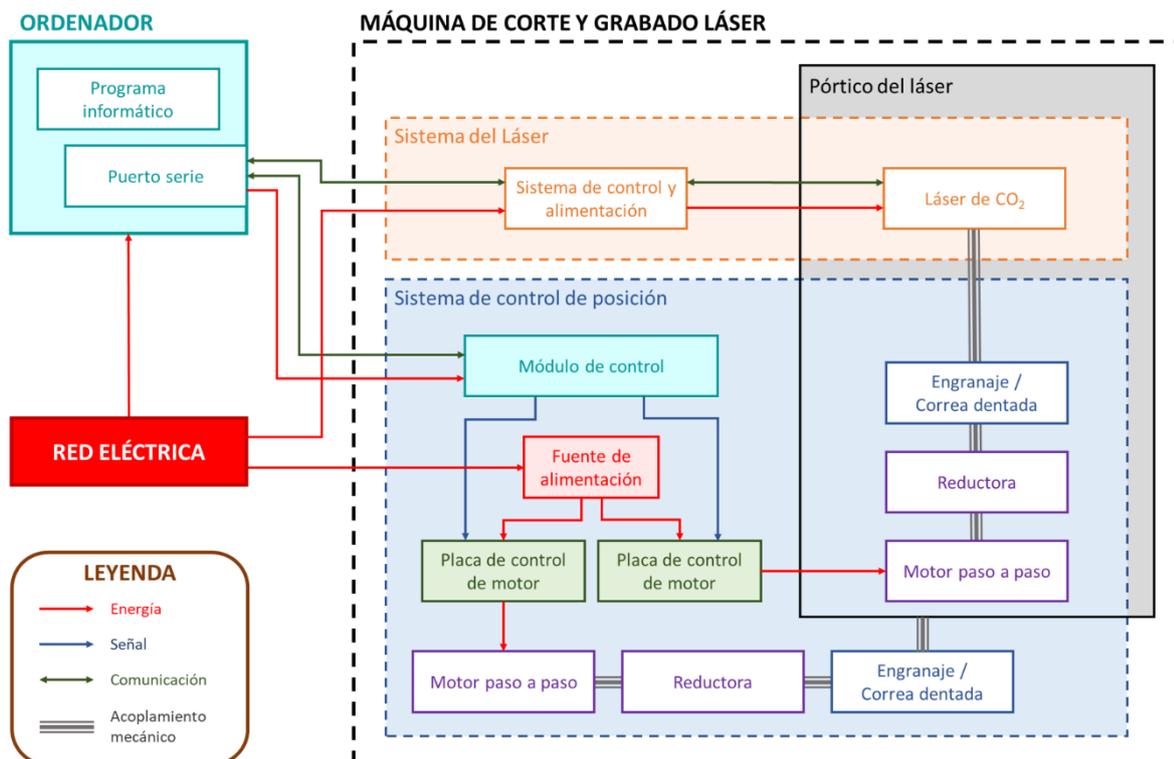


Ilustración 4. Diagrama de bloques de la instalación

2.1.3. Control por ordenador

Como se ha explicado anteriormente, conectado a la máquina de corte y grabado láser hay un ordenador portátil con sistema operativo Windows XP que contiene el programa informático que realiza el control de la máquina. Es decir, el ordenador hace de interfaz de usuario para controlar la máquina.

Habiéndose observado la máquina, se ha podido determinar sus componentes y cómo están conectados entre sí. Por este motivo, se sabe cómo se relacionan unos con otros y que el control se realiza desde programa informático, enviando instrucciones al láser y al sistema de control. Pero, para comprender el comportamiento de la máquina en profundidad, es necesario analizar el código del programa informático.

2.1.3.1. Programa informático

El programa consiste en un conjunto de ficheros cuya ejecución permite el control de la máquina (los ficheros de mayor interés están disponibles en el Anexo 3). Se transmiten las instrucciones al módulo de control de los motores y al sistema de control del láser de CO₂ mediante comunicación por puerto serie.

El código contenido en los ficheros está escrito en lenguaje de programación BASIC, denotado por la extensión ".bas" de los ficheros. Empleando herramientas informáticas como Notepad++, se ha conseguido especificar la implementación de BASIC siendo, en este caso, FreeBASIC.

Analizando el código, se ha podido observar que la finalidad del programa es desempeñar, fundamentalmente, dos funciones; y que las partes del código que permiten su ejecución presentan cierto nivel de independencia entre sí, encontrándose en distintos ficheros. Estas funciones son el control del láser de CO₂ y el control de su posición. El resto de las funciones que desempeña el programa están orientadas a la correcta realización de estas dos funciones principales.

2.1.3.1.1. Control del láser

De entre los ficheros del programa, se ha podido observar que hay algunos que están dedicados a controlar parámetros referentes al láser de CO₂ de forma exclusiva (ver fichero "laser.bas" en el Anexo 3), como son:

- Control de la refrigeración
- Apertura y cierre del obturador
- Ajuste de la corriente
- Rango de frecuencia de trabajo

Variando dichos parámetros es posible regular el funcionamiento del láser, consiguiéndose, de esta forma, realizar el control del láser desde el ordenador.

Estos son los parámetros que permiten variar las características del haz de luz láser para lograr distintos efectos de acabado para los cortes y grabados; modificando el nivel de penetración del láser en el material según el resultado buscado.

Una característica destacable de este fragmento de código es que la comunicación que se da por el puerto serie entre ordenador y el sistema de control del láser es en las dos direcciones. Es decir, que hay una realimentación de información sobre el láser. Esto se ha podido observar debido a que, a lo largo del código, hay funciones que permiten realizar una lectura del valor de dichos parámetros desde el ordenador.

Descripción del estado actual de la instalación

2.1.3.1.2. Control de posición

Al igual que sucede con el control del láser, hay ficheros específicos dedicados al control de la posición del láser. El programa realiza esta función mediante el control de los motores paso a paso; ya que, como se ha explicado anteriormente, el giro de los motores produce el movimiento del láser sobre el plano de la superficie de corte.

Al tratarse de un movimiento de dos grados de libertad, la posición del láser se determina como un punto sobre el plano. Por este motivo, el programa diferencia los motores según el eje del plano sobre el que actúan, clasificándolos como "motor X" y "motor Y".

Para poder determinar cuánto debe girar cada motor para alcanzar una determinada posición, el programa realiza operaciones matemáticas para conocer la relación entre el avance o retroceso en la dirección de un eje y el ángulo de giro del motor. Al tratarse de motores paso a paso, el ángulo de giro del motor está determinado por el paso del motor; es decir, a qué ángulo equivale un paso del motor; y el número de pasos que dé. Por este motivo, las operaciones que realiza el programa están planteadas para "traducir" la posición al número de pasos que ha de dar cada motor, tal como se muestra en el siguiente trozo de código (fragmento de código del fichero "principal.frm" disponible en el Anexo 3):

```
pasosX = CLng(Val(txtPosX.Text) / 0.3756) * 50 '(reducción 1:50)
'lee la posición en mm y la pasa a pasos de motor
pasosY = CLng(Val(txtPosY.Text) / 0.3756) * 50
'lee la posición en mm y la pasa a pasos de motor
```

Para controlar el giro de los motores paso a paso, el programa actúa además sobre otros parámetros relativos a los motores, como son:

- Velocidad
- Aceleración
- Avance / retroceso

Al contrario de lo que sucedía en el control del láser, la comunicación por puerto serie entre el ordenador y los motores es unidireccional. Esto se aprecia debido a que la única transmisión de información que aparece en el código es la comunicación de los datos de avance desde el ordenador a los motores. Es decir, no hay realimentación de información sobre la posición. Esto concuerda con la información que se conoce del sistema de control de posición: el control de los motores se realiza a través de los drivers y no se dispone de ningún encoder (codificador rotativo de posición) que permita conocer la posición del eje del motor en un determinado instante.

2.1.3.1.3. Introducción de instrucciones

Una secuencia de posiciones que debe alcanzar el láser, son una sucesión de puntos sobre el plano de la superficie de corte que constituyen una trayectoria. Haciendo uso el control de posición realizado por el programa mediante el control de los motores, el láser puede posicionarse, uno por uno, en cada uno de los puntos de la trayectoria. Una combinación del movimiento del láser de un punto al siguiente acompañado de la variación de las características del haz de luz láser según lo que le indique el programa, puede dar lugar a distintas formas, figuras o incluso texto cortadas o grabadas sobre un material.

El programa permite la introducción de trayectorias a ser ejecutadas por el láser mediante una secuencia de instrucciones en formato xls:

Tabla 1. Ejemplo de secuencia de instrucciones

id	posX	posY	Laser
1	50	0	open
2	75	25	close
3	100	0	open
4	125	25	close
5	150	0	open
6	175	25	close
7	200	0	open
8	225	25	close
9	250	0	open
10	350	0	close

Se introduce una trayectoria mediante una descripción punto por punto en forma de coordenadas cartesianas. Se le indica al programa de forma sucesiva de qué punto a qué punto se deseada mover el haz de luz láser y si este debe estar activo durante el desplazamiento; dando lugar a un corte o grabado con una forma concreta.

2.2. INFORMACIÓN TÉCNICA DE LOS COMPONENTES

2.2.1. Fuente de alimentación

La información inicial que se dispone de la fuente de alimentación del sistema de control de posición; o sea, la alimentación de los motores; son las fotografías tomadas en el laboratorio (disponibles en el Anexo 1). Una de esas fotografías es la siguiente:



Ilustración 5. Fotografía de la fuente de alimentación

Gracias a los números de serie impresos sobre la PCB y los componentes electrónicos, se ha podido determinar el tipo de fuente de alimentación y, por comparación, se ha logrado identificar el modelo concreto de la fuente.

Se trata de una fuente de alimentación la marca XP POWER perteneciente a la categoría "HUL series". Dentro de esta categoría, la fuente de alimentación pertenece a la clasificación de 300 vatios (HUL300), siendo el número de modelo concreto el HUL300-14.

Conociendo el modelo concreto, se ha estudiado la hoja de características en el que se encuentra toda la información relativa a la fuente (disponible en el Anexo 4). De esta forma, se sabe que el funcionamiento de la fuente de alimentación se basa en la transformación de corriente alterna a corriente continua (AC-DC) para poder realizar un suministro de un determinado nivel de voltaje de corriente continua.

Descripción del estado actual de la instalación

En lo que se refiere a las características más relevantes de la fuente de alimentación, se ha podido determinar que a la salida de una fuente XP POWER de modelo HUL300-14 se obtiene lo siguiente:

- Potencia de 200W si emplea enfriamiento por convección y 300W si se enfría mediante un suministro de 30CFM de aire.
- Voltaje nominal de salida de 24V, con una tolerancia del 5%
- Corriente mínima de salida de 0,5A
- Corriente máxima de salida de 12,5A

Además de estas características, también se conocen los distintos conectores y su distribución:

Tabla 2. Características de la fuente de alimentación

Output 1			Output 2			Output 3			Output 4 ⁽⁹⁾			Model Number ⁽⁹⁾
Voltage Nom	Current		Voltage Nom	Current		Voltage nom	Current		Voltage nom	Current		
	Min	Max		Min	Max		Min	Max		Min	Max	
24.0 V	0.5 A	12.50 A										HUL300-14†

Tabla 3. Conectores de la fuente de alimentación

P2 Connector			P3 Connector		
Pin	Single Output	Multi Output	Pin	Single Output	Multi Output
1	Output 1	Output 3	1	Fan +	Return
2	Output 1	Output 1	2	Return	DC OK ⁽⁷⁾
3	Output 1	Output 1	3	DC OK	Return
4	Output 1	Output 1	4	Power Fail Detect	Remote On/Off ⁽⁸⁾
5	Output 1	Output 1	5	Remote On/Off ⁽⁸⁾	Return
6	Output 1	Return	6	Return	Power Fail Detect
7	Output 1	Return			
8	Return	Return			
9	Return	Return			
10	Return	Return			
11	Return	Output 2			
12	Return	Output 2			
13	Return	Output 4			
14	Return	Output 4 Return			

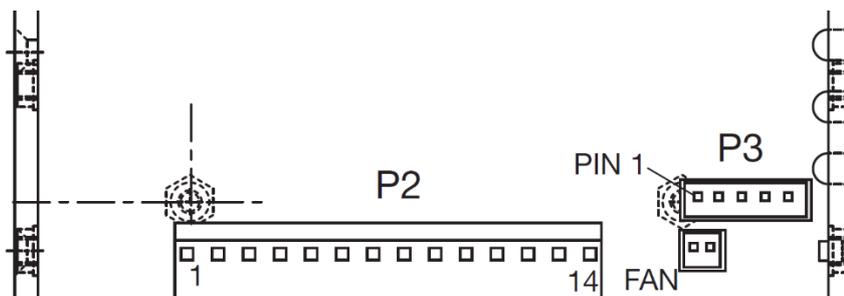


Ilustración 6. Pines de la fuente de alimentación

Descripción del estado actual de la instalación

2.2.2. Motores paso a paso

Los dos motores paso a paso de los que consta la máquina para el posicionamiento del láser son del mismo modelo y, por tanto, tienen las mismas características, las mismas especificaciones técnicas y el mismo funcionamiento.

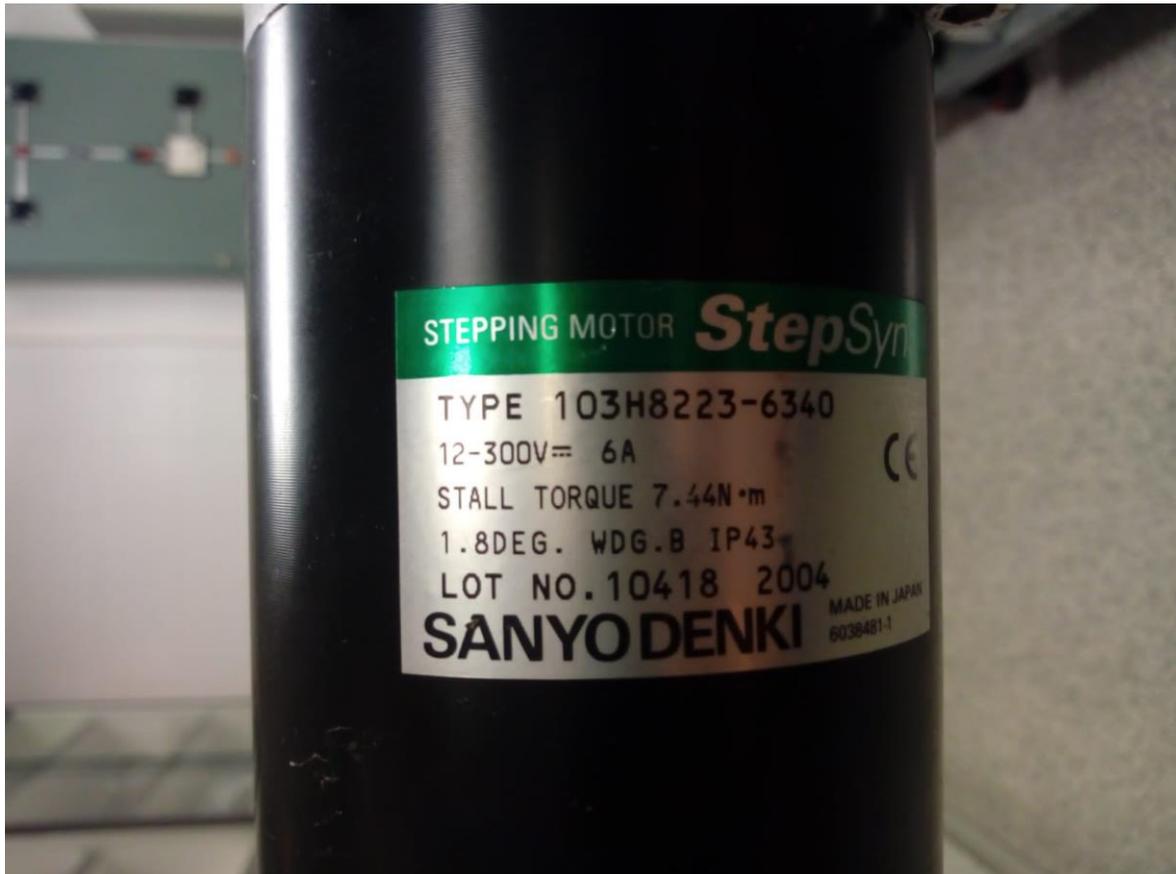


Ilustración 7. Fotografía del motor paso a paso

Se tratan de motores paso a paso del fabricante SANYO DENKI de la categoría StepSyn. En concreto, el modelo específico del motor es el 103H8223-6340. Además del modelo, en la propia etiqueta aparece la siguiente información técnica:

- Alimentación: DC de entre 12 y 300V a 6A
- Par motor (stall torque): 7,44 Nm
- Paso del motor: 1,8° por paso
- Grado de protección: IP43

Cabe destacar que el dato de la alimentación concuerda con lo que se sabe de la fuente de alimentación, que suministra 24V de continua y hasta 12,5A.

Descripción del estado actual de la instalación

Conociendo el modelo del motor y la marca, es posible recabar más datos sobre sus especificaciones técnicas al consultar la información que pone SANYO DENKI a disposición de los usuarios. La información sobre el motor 103H8223-6340 se encuentra en el catálogo de los motores SANMOTION F2 (extractos disponibles en el Anexo 4).

Los motores SANMOTION F2 son motores paso a paso de dos fases. El motor en cuestión es, además, un motor bipolar de un solo eje; encontrándose en la categoría de motores de 86mm de diámetro ($\varnothing 86$):

Tabla 4. Motores SANMOTION F2 Bipolares de 86mm de diámetro

Bipolar winding, Lead wire type CE model

Model no.	Single shaft	Dual shaft	Holding torque at 2-phase energization N·m min.	Rated current A/phase	Wiring resistance Ω /phase	Winding inductance mH/phase	Rotor inertia $\times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$	Mass kg	Motor length (L) mm
103H8221-6240		103H8221-6210	2.74	6	0.3	1.65	1.45	1.5	62
103H8222-6340		103H8222-6310	5.09	6	0.35	2.7	2.9	2.5	92.2
103H8223-6340		103H8223-6310	7.44	6	0.45	3.4	4.4	3.5	125.9

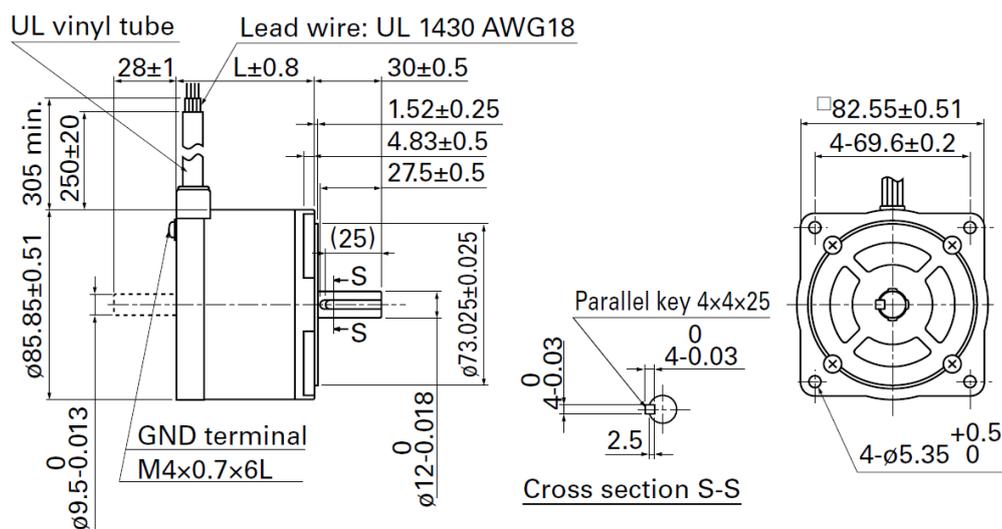


Ilustración 8. Dimensiones del motor

Además, también se dispone de información relativa al devanado interno del motor, su cableado y conexionado y el modo de operación para el avance del motor:

When excited by a direct current in the order shown below, the direction of rotation is clockwise as viewed from the output shaft side.

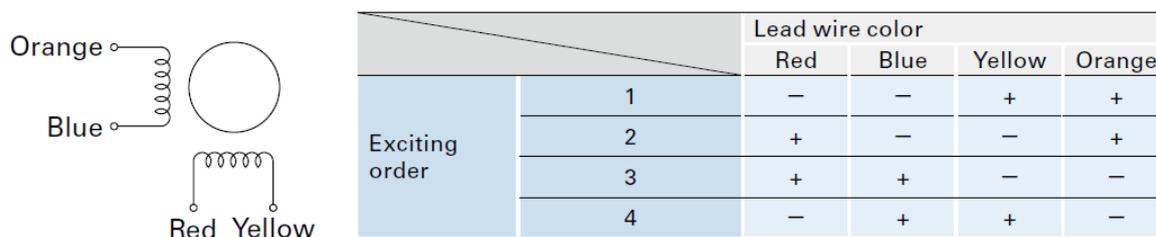


Ilustración 9. Cableado y funcionamiento del motor

Descripción del estado actual de la instalación

2.2.3. Reductoros

El modelo de las reductoros acopladas a los ejes de los motores paso a paso se pueden determinar con facilidad. Esto se debe a que la información para su identificación está presente en una placa situada en un lateral de las mismas:



Ilustración 10. Fotografía de la reductora

Por la fotografía, se sabe que se trata de una reductora de la marca Rexroth, modelo GTM060--NN-2-050C-NN03. A parte de la información identificatoria de la reductora, también viene indicado el factor de reducción que produce siendo, en este modelo, una ratio de 50:1.

Las dos reductoros de las que consta la máquina son exactamente de la misma marca y modelo. Son distintas, únicamente, por el número de serie; distinguiéndose sólo por el último dígito: 321277-72684 para una reductora y 321277-72685 para la otra (ver fotografías del Anexo 1).

Conociendo el modelo y la marca de las reductoros, se ha encontrado el material de referencia para la consulta de sus datos técnicos. Este material consiste en un "Manual de Planificación de Proyecto" de Rexroth para reductoros de engranajes planetarios de la familia GTM (fragmentos de este manual se pueden encontrar en el Anexo 4). A parte de especificaciones técnicas sobre las reductoros, dicho manual incluye instrucciones sobre su modo de empleo y montaje.

Descripción del estado actual de la instalación

De la información que facilita Rexroth, cabe destacar los detalles técnicos sobre su funcionamiento; presentes en la siguiente tabla (tabla completa en Anexo 4):

Tabla 5. Datos técnicos de la reductora

Type		GTM060- NN2-050	
Transmission		Two-stage	
Transmission level i		50	
Nominal input speed $n_{IN N}$	rpm	6000	
Max. input speed	rpm	10000	
Max. output rotary speed	rpm	200	
Nominal input torque	Nm	0.5	
Nominal output torque	Nm	25	
Max. input torque	Nm	1	
Max. output torque	Nm	50	
Torsional backlash	Standard	arcmin	≤ 8
	Reduced	arcmin	≤ 6
Torsional rigidity D	Nm/arcmin	3.5	
Efficiency η	%	94	
Moment of inertia J	kg·cm ²	0.1	

(Servo Planetary Gearbox | Bosch Rexroth USA, s. f.)

3. MARCO TEÓRICO

3.1. FUNDAMENTOS DEL CORTE Y GRABADO LÁSER

3.1.1. Definición de láser

“Láser” es un término que procede del acrónimo inglés LASER (Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation). Lo cual se traduce a “amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación”.

La luz se transmite mediante ondas; de tal forma que, la luz de cada color tiene una longitud de onda distinta (p.ej.: el color de luz rojo tiene mayor longitud de onda que el azul). La luz solar se compone de luz con diferentes longitudes de onda cuya combinación da lugar a la luz blanca apreciable a la vista humana.

La luz que compone un rayo láser está conformada por haces con longitudes de onda similares que se encuentran en fase (luz coherente), dando lugar a un rayo muy estrecho con alta concentración de energía que se puede enfocar en una superficie muy pequeña. Debido a la concentración de energía y a que los rayos láser permanecen enfocados en un punto sin dispersarse, la luz láser puede viajar largas distancias.

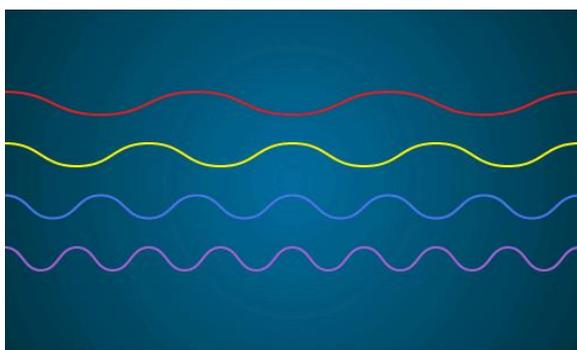


Ilustración 11. Comparación de colores de luz por longitud de onda

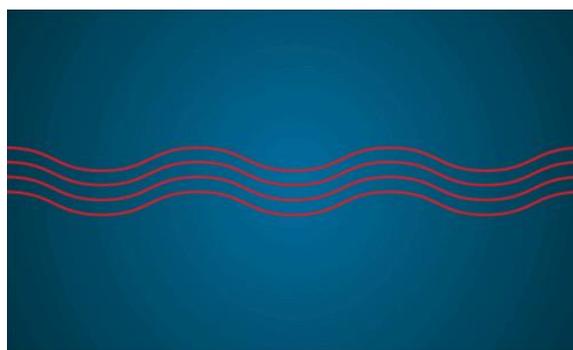


Ilustración 12. Representación de ondas de un rayo láser en fase

(What Is a Laser? | NASA Space Place – NASA Science for Kids, s. f.)

Un láser es, por tanto, un dispositivo que permite emitir un haz de luz coherente mediante un proceso de amplificación realizado por medios ópticos, haciendo uso del fenómeno de emisión estimulada (¿Qué es un láser? | ¿Cómo se usa la tecnología láser? es-us, s. f.).

3.1.2. Funcionamiento de un láser

Independientemente de sus características, todo láser consta de las siguientes partes fundamentales:

- Medio activo: Material que emite luz al ser excitado.
- Sistema de bombeo: Realiza la excitación del medio activo para producir el fenómeno de emisión estimulada.
- Cavity resonante o resonador: Consiste en dos espejos que forman una cavidad en cuyo interior se sitúa el medio activo.

Al excitarse, el medio activo genera luz en el interior de la cavidad resonante y, al rebotar entre los espejos se produce su amplificación. Uno de los espejos es semi-reflectante, por lo que permite la salida de parte de la luz amplificada en forma de haz.

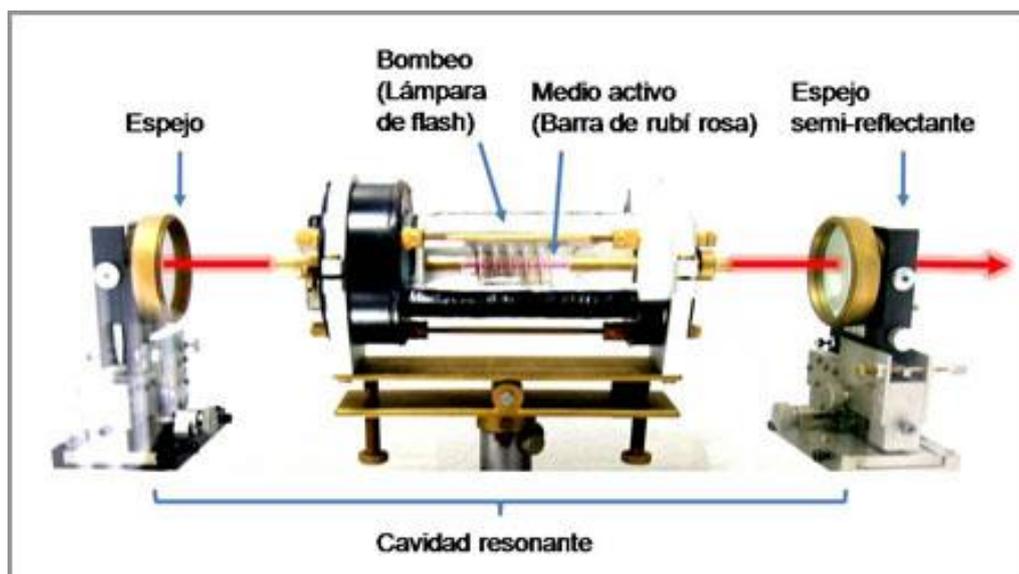


Ilustración 13. Funcionamiento de un láser

El medio activo puede ser un material sólido, líquido o gas; confiriendo al láser de características muy diversas según su composición. Esto da lugar a un abanico de variedad de aplicaciones dependiendo del tipo de láser (Bits | CLPU, s. f.).

Uno de los tipos de láser más comunes es el que emplea un medio activo de gas de dióxido de carbono (láser de CO₂), el cual emite en el rango de frecuencia del infrarrojo lejano con una longitud de onda de 10,6μm («Láser», 2020). El láser de CO₂ puede emplearse en un régimen de emisión continuo o pulsado y con una potencia de pico máxima aproximada de 1kW; con variedad de utilidades de que incluyen el corte y la soldadura (Bits | CLPU, s. f.).

3.1.3. Principios físicos de un láser

En un átomo, los electrones de la corteza electrónica no pueden poseer cualquier valor de energía, sino que se encuentran distribuidos en niveles de energía bien definidos. Sin embargo, los electrones pueden pasar de un nivel de energía a otro emitiendo o absorbiendo la diferencia de energía entre niveles.

Los electrones que se encuentran en niveles de energía elevados tienden a caer de forma espontánea a un nivel de energía inferior, emitiendo la correspondiente diferencia de energía en forma de luz. Este fenómeno se conoce como emisión espontánea, y es origen de la mayor parte de la luz visible (*Bits | CLPU, s. f.*).

Por el contrario, la emisión estimulada es el fenómeno que se produce al forzar a un electrón a que decaiga a un nivel de energía inferior al suministrarle la diferencia de energía necesaria en forma de luz. Al decaer, el electrón genera dos haces de luz con las mismas características del haz que lo obligó a decaer, doblándose la intensidad de la luz inicial (*Laser2020.pdf, s. f.*). Esto permite amplificar la luz y hace que la luz generada sea coherente (*Bits | CLPU, s. f.*).



Ilustración 14. Comparación entre emisión espontánea y estimulada (Laser2020.pdf, s. f.)

Sin embargo, para que la emisión estimulada sea posible, es necesario generar una "inversión de población" en el medio activo; es decir, que posea mayor número de electrones en niveles de energía superiores que en los inferiores. Esto solo es posible empleando ciertos materiales con niveles de energía metaestables, que significa que los electrones tardan en decaer por emisión espontánea; lo cual favorece la acumulación de electrones en niveles de energía superiores (*Bits | CLPU, s. f.*).

3.1.4. Características de la luz laser

El hecho de generar luz mediante el fenómeno físico de emisión estimulada contrasta con el resto de las fuentes de luz, que se basan en la emisión espontánea. Esto hace que el haz de luz láser tenga algunas propiedades características de interés:

- Alta potencia (y capacidad de ser amplificada)
- Capacidad de emitirse en pulsos de corta duración
- Frecuencia de emisión bien definida (Bits | CLPU, s. f.)
- Monocromaticidad: La luz láser se compone de una única longitud de onda, lo que se traduce en que el láser es de un solo color, en el caso del espectro visible.
- Coherencia: Las ondas que forman el haz de luz oscilan en una relación de fase constante.
- Direccionalidad: La luz láser se emite en forma de rayos. Esto hace que se propague en una única dirección concentrando una gran cantidad de energía en un área muy pequeña.

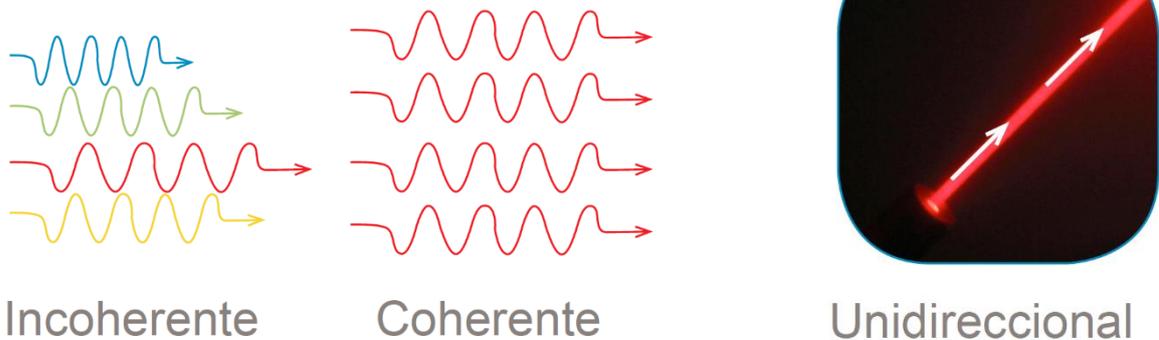


Ilustración 15. Comparación entre luz coherente e incoherente

Ilustración 16. Direccionalidad de la luz láser

(*Laser2020.pdf*, s. f.)

Estas características, hacen que los láseres tengan un amplio rango de funciones que incluyen lectores ópticos, escáneres, aplicaciones en procedimientos médicos y quirúrgicos, procesamiento de información, comunicación, telemetría, herramientas de precisión y procesos de fabricación (*¿Qué es un láser? | ¿Cómo se usa la tecnología láser? es-us*, s. f.).

3.1.5. Procesamiento de materiales con láser

Una de las aplicaciones más notables de un láser es su empleo en el procesamiento de materiales; es decir, emplear la energía de un rayo láser para transformar un material. Mediante este uso se obtienen acabados de gran calidad y, además, tiene un rango de aplicación en gran variedad de materiales distintos.

El efecto se consigue al emplear un láser sobre un material depende del tipo de láser y sus características, como el tipo la longitud de onda y la potencia del láser; además de las características fisicoquímicas del material a tratar. Según la interacción que se da entre la energía láser y el material, los procesos posibles se pueden agrupar en dos categorías:

- Ablación del material: Se remueve material total o parcialmente
- Modificación de la superficie del material: Se alteran el aspecto o las propiedades de un material.

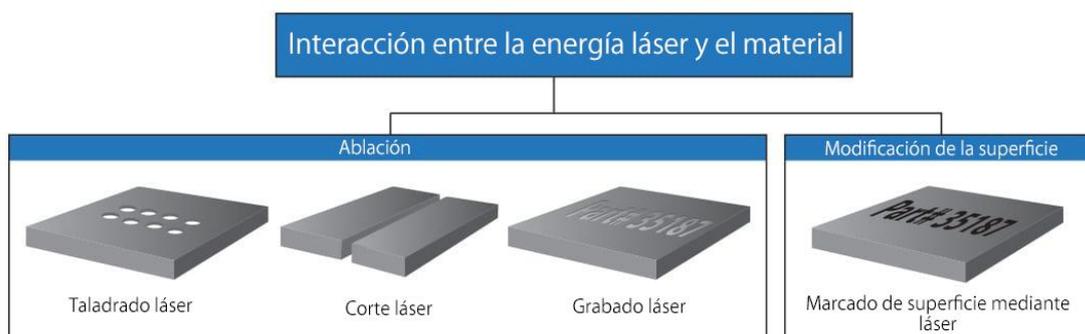


Ilustración 17. Clasificación de procesos láser

(Procesamiento de materiales mediante láser | Interacción - Modificación es-us, s. f.)

Al regular de forma precisa la longitud de onda, la potencia, el ciclo de trabajo y la tasa de repetición del láser, se originan distintos tipos de transformaciones de material conocidos como procesos láser. Algunos de los procesos láser más extendidos son: Recocido láser, corte láser, taladrado láser, grabado láser, grabado láser químico, maquinado láser, marcado láser, micro maquinado láser, perforado láser, grabado de foto láser, marcado de foto láser, rayado láser, sinterizado láser, modificación láser de la superficie, ablación láser selectiva (Lista de procesos láser | Interacción - Modificación es-us, s. f.).

3.1.5.1. Procesos de ablación láser

3.1.5.1.1. Corte láser

El corte láser consiste en remover y separar completamente el material, de lado a lado, siguiendo una trayectoria determinada.

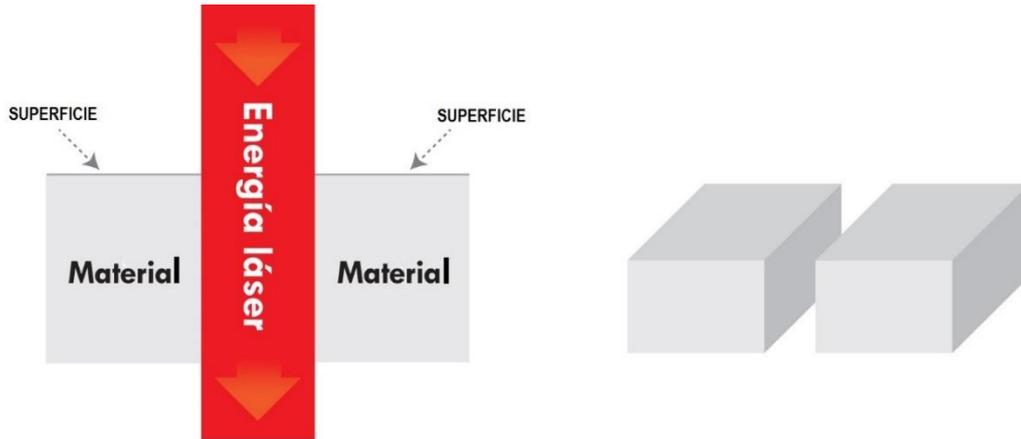


Ilustración 18. Corte láser

(Corte láser | Cortador láser y equipos es-us, s. f.)

3.1.5.1.2. Grabado láser

El grabado láser consiste en remover material desde la superficie hasta la profundidad deseada.

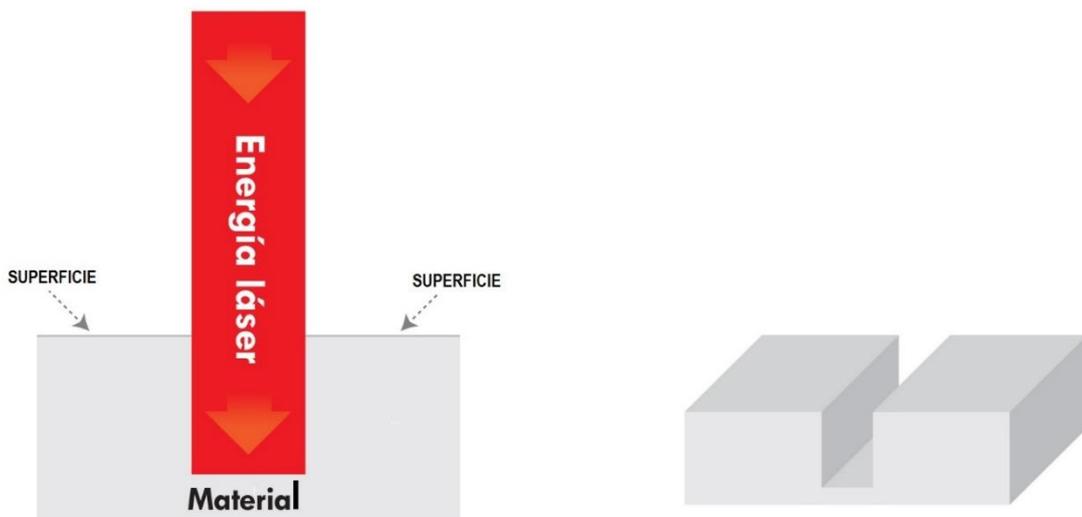


Ilustración 19. Grabado láser

(Grabado láser | Máquinas de Grabado láser químico - Grabado láser es-us, s. f.)

3.1.5.1.3. Factores de la ablación láser

Uno de los factores más relevantes a considerar para el correcto desempeño de estos procesos es la relación entre las características del material y la potencia del láser.

Por un lado, al aumentar la potencia del láser se incrementa la velocidad del proceso y la cantidad de material removido. Por otro lado, cuanto mayor es el espesor o la densidad del material, más potencia requiere el proceso.

Calibrando la potencia para un material, se logran mayores grados de penetración. Conforme mayor es la potencia, mayor es la profundidad, obteniéndose distintos niveles de grabado o incluso un corte.

Además, se han de tener en cuenta otros factores como la capacidad de algunos materiales de reflejar parte de la energía del láser (Grabado láser | Máquinas de Grabado láser químico - Grabado láser es-us, s. f.).

3.1.5.2. Marcado láser

El marcado láser retira material de la superficie o la modifica para alterar su color, contraste o reflectividad. Es posible marcar sobre un material figuras, información legible o incluso fotografías.

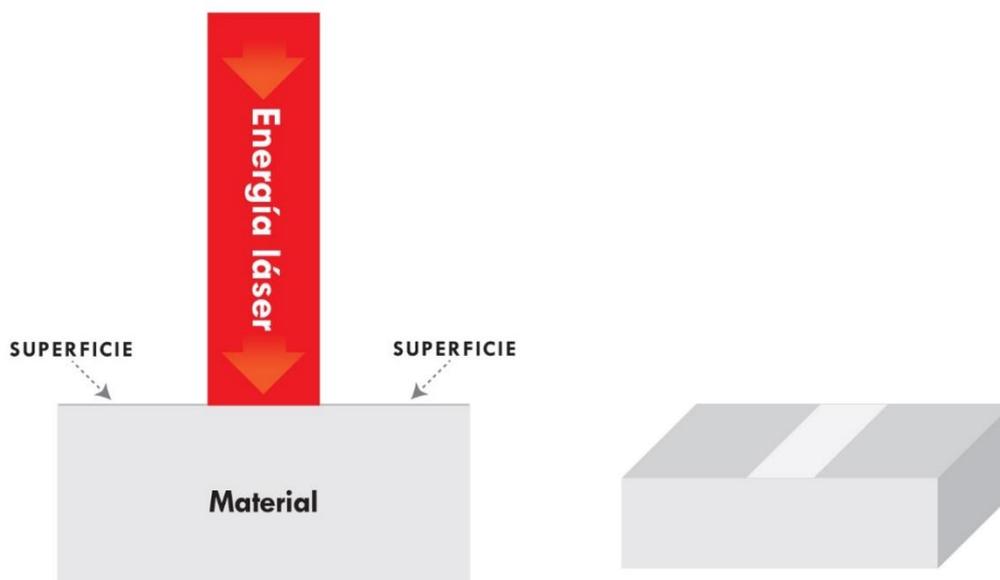


Ilustración 20. Marcado láser

En el caso del marcado, uno de los factores más relevantes para lograr el acabado deseado es la relación la longitud de onda del láser y el efecto que produce en cada material (Máquinas y sistemas de marcado láser | Marcador láser es-us, s. f.).

3.2. MOTORES PASO A PASO

3.2.1. Definición de motores paso a paso

Los motores paso a paso son un tipo de motor brushless (sin escobillas) de corriente continua que convierten una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos («Motor paso a paso», 2020). Esto significa que cada rotación completa está dividida en un número determinado de pasos iguales; es decir, un número fijo de posiciones angulares.

Este tipo de motores gira realizando rotaciones incrementales posicionándose según los pasos posibles, girando un determinado ángulo dependiendo de sus entradas de control (Mecafenix, 2017). De tal forma que, un motor paso a paso es capaz de convertir una serie de impulsos eléctricos en un incremento bien definido en la posición rotacional del motor; cada pulso hace que el eje rote un determinado ángulo («Stepper Motor», 2020).

Los motores paso a paso se fabrican de forma que pueden dar una determinada cantidad de pasos por revolución. Algunos de los valores más empleados son 12, 24, 72, 144, 180 y 200. Esto resulta en rotaciones del eje de 30°, 15°, 2.5°, 2° y 1.8° por paso respectivamente. Estos valores angulares se conocen como paso del motor. Sin embargo, es posible fraccionar cada uno de estos pasos en subdivisiones iguales empleando distintos métodos, pudiendo aumentarse de esta forma la precisión del motor (*Motor paso a paso*, s. f.).

Los motores paso a paso son capaces de girar un pequeño ángulo por cada pulso aplicado, además de que poseen la habilidad de quedar enclavados en una posición (Mecafenix, 2017). Esto da lugar a dos de principales ventajas: la precisión y la repetitividad en el posicionamiento del eje («Motor paso a paso», 2020).

Los pulsos son fácilmente controlables desde un ordenador o microcontrolador, pudiendo lograrse un posicionamiento y control de velocidad muy precisos. Por este motivo, el uso de los motores paso a paso es, teóricamente, ideal en aplicaciones que requieren un control de precisión (*All About Stepper Motors*, s. f.). Algunas de estas aplicaciones son: brazos robóticos, drones, impresoras digitales, impresoras 3D, cajeros automáticos, cámaras de video, procesos de automatización, etc. («Motor paso a paso», 2020).

3.2.2. Principio de funcionamiento

Al igual que el resto de los motores eléctricos, los motores paso a paso constan de una parte estacionaria (estator) y un parte móvil (rotor). El estator tiene unos "dientes" a los que se encuentran cableados las bobinas del motor. El rotor es o un imán permanente o un núcleo de hierro de reluctancia variable con forma de engranaje (*Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS, s. f.*).

A efectos prácticos, un motor paso a paso está formado por electroimanes dentados situados formando un círculo en torno al rotor. Los electroimanes a su vez están organizados en grupos de igual número llamados fases («Stepper Motor», 2020):

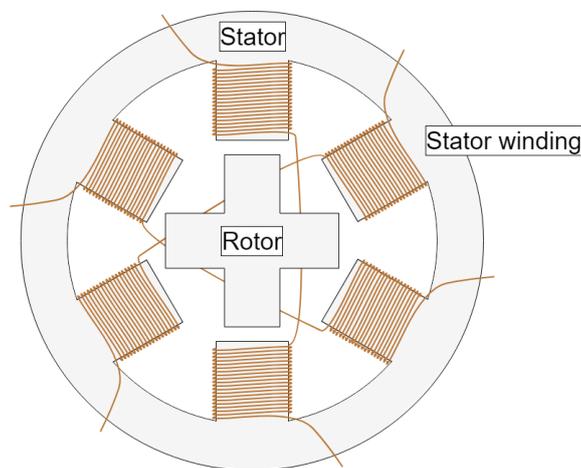


Ilustración 21. Estructura motor paso a paso

Esencialmente, el principio de funcionamiento consiste en que al hacer circular corriente eléctrica por una o más de las fases del estator, se genera un campo magnético que produce que el rotor se posicione para quedar alineado con él. Alimentando las distintas fases siguiendo una secuencia, el rotor puede ir girando para ir posicionándose en la dirección de los diferentes campos magnéticos generados dando un paso cada vez:

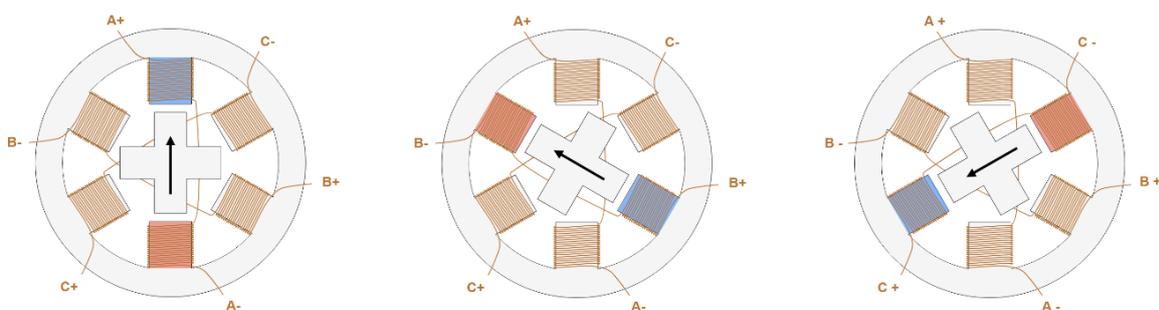


Ilustración 22. Funcionamiento de un motor paso a paso

(*Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS, s. f.*)

3.2.3. Estructura interna

Las características de un motor paso a paso están condicionadas por cómo es su estructura interna, pudiendo disponer el estator y el rotor formando distintas configuraciones. Esto también afecta a cómo se realiza el control de dicho motor.

3.2.3.1. Estator

El estator es la parte del motor que genera los campos magnéticos a los que se alinea el rotor produciendo el giro del motor. Las principales características del estator son:

- Número de fases: Es el número de bobinas independientes. Generalmente cada motor tiene 2 fases.



Ilustración 23. Fases de un motor paso a paso

- Número de parejas de polos: Es el número de parejas de dientes que ocupan cada fase.

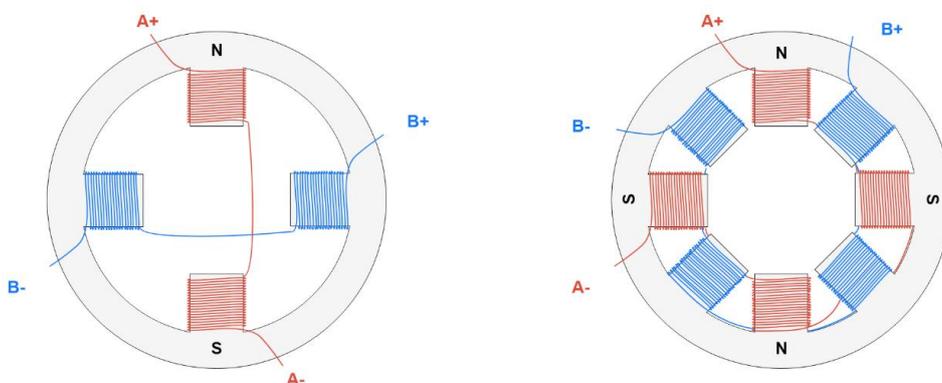


Ilustración 24. Polos de un motor paso a paso

(*Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS, s. f.*)

3.2.3.2. Rotor

Los motores paso a paso pueden tener 3 tipos distintos de rotor:

3.2.3.2.1. Rotor de imán permanente

El rotor es un imán permanente que se alinea con el campo magnético que genera el estator. Esto supone que el motor impone cierta resistencia a cambiar de posición. Sin embargo, tiene menor precisión que los otros tipos:

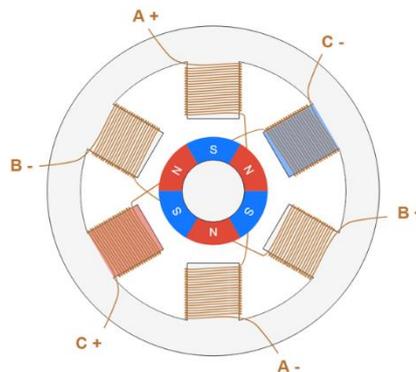


Ilustración 25. Rotor de imán permanente

3.2.3.2.2. Rotor de reluctancia variable

El rotor está hecho de un núcleo de hierro con forma específica que le permite alinearse con los campos magnéticos. Este tipo permite alcanzar mayores resoluciones más fácilmente (ver Ilustración 21 y 22).

3.2.3.2.3. Rotor híbrido

Este tipo combina las características de los dos anteriores:

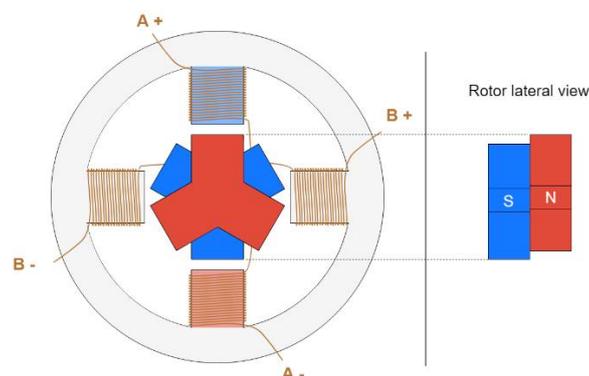


Ilustración 26. Rotor híbrido

El mayor número de dientes en el rotor le permite lograr el menor paso de motor de entre los distintos tipos (*Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS, s. f.*).

3.2.4. Control de un motor paso a paso

Para poder generar el movimiento del motor es necesario controlar la dirección de la corriente eléctrica que se hace circular por las bobinas del estator, lo cual determina la dirección del campo magnético.

Para poder controlar correctamente el funcionamiento de un motor paso a paso es necesario controlar la dirección del campo magnético de sus bobinas. Para lograr esto, se necesitan varios dispositivos:

- Microcontrolador: Programado por el usuario, envía señales específicas al driver para lograr el comportamiento deseado en el motor.
- Driver: Es el dispositivo electrónico que regula la corriente eléctrica que circula por las bobinas del motor. Está formado por:
 - Circuito de conmutación: Formado por transistores, controla físicamente la conexión a las bobinas de los motores. Se necesita un circuito de transistores por cada fase del motor.
 - Pre-driver: Controla la activación de los transistores.

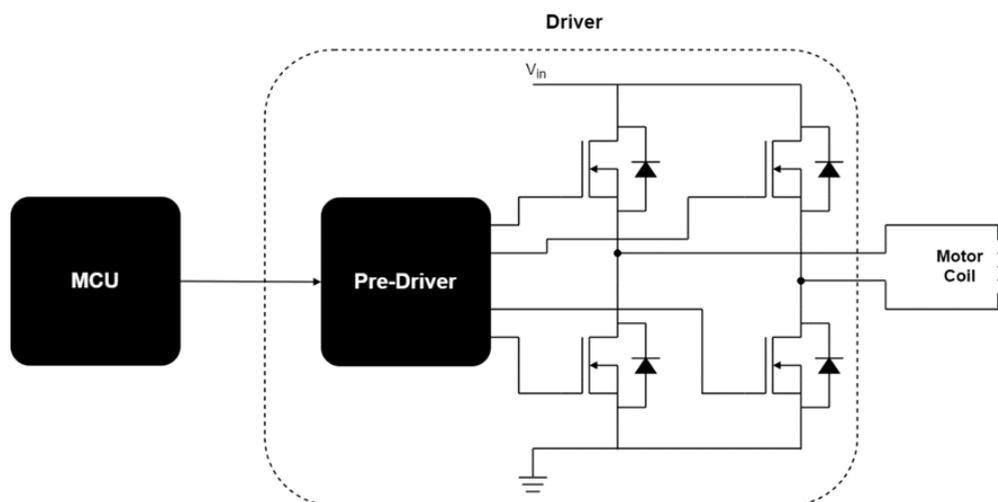


Ilustración 27. Control de un motor paso a paso

3.2.5. Tipos de motores paso a paso

Según la configuración de las bobinas de un motor paso a paso, se pueden clasificar en dos categorías: unipolar y bipolar. Esta configuración afecta cómo se cambia la dirección de la corriente; dando lugar a dos formas de realizar el control de un motor pasos a paso según sea unipolar o bipolar (*Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS, s. f.*).

3.2.5.1. Unipolares

Estos motores suelen tener 5 o 6 cables de salida dependiendo de su conexión interna y se caracteriza por requerir una electrónica de control más simple que los motores bipolares («Motor paso a paso», 2020).

En un motor unipolar, cada bobina consta de una toma media. De tal forma que para cambiar los polos magnéticos sólo es necesario cambiar qué terminal de la bobina es la toma de tierra, sin cambiar la dirección de la corriente. Esto hace que el circuito de conmutación sea muy simple («Stepper Motor», 2020).

A partir de la imagen que se presenta a continuación (Ilustración 28) se puede observar:

- Si el MOSFET 1 está activo, la corriente circula de A_M a $A+$, generándose el campo magnético en una dirección.
- Si el MOSFET 2 está activo, la corriente circula de A_M a $A-$, generándose un campo magnético en la dirección contraria que el caso anterior.

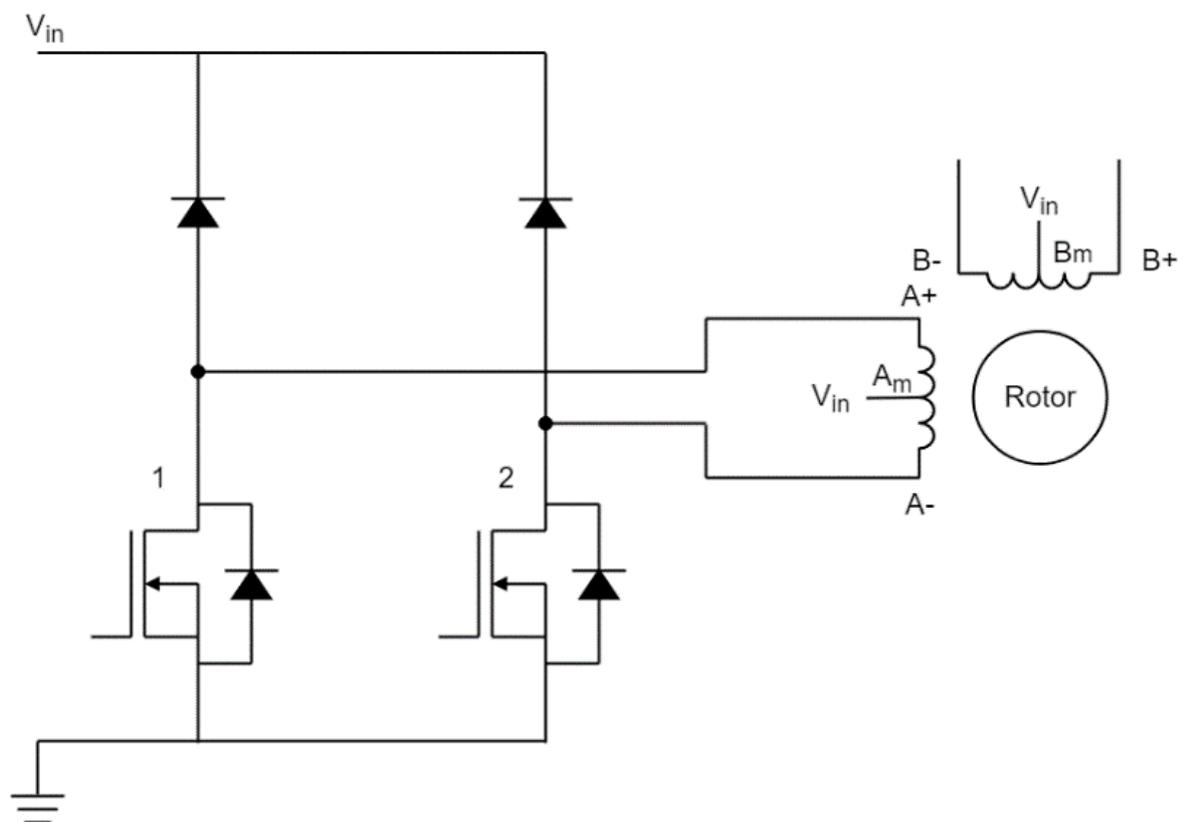


Ilustración 28. Circuito de control motor unipolar

(Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS, s. f.)

3.2.5.2. Bipolares

Este tipo de motores tienen, generalmente, 4 cables de salida y su control requiere una electrónica de control de mayor complejidad que los motores unipolares («Motor paso a paso», 2020).

Los motores bipolares tienen una única bobina por fase. Por este motivo, para poder cambiar la dirección del campo magnético es necesario hacer que la corriente eléctrica que circula por la bobina vaya en dirección contraria, siendo necesario un circuito de conmutación de mayor complejidad que en el caso anterior («Stepper Motor», 2020).

El circuito electrónico que más se ajusta a esta necesidad es el puente en H. Observando la siguiente imagen (Ilustración 29), se puede observar:

- Si los MOSFET 1 y 4 están activos, la corriente circula por la bobina de A+ a A-, generándose un campo magnético en una dirección.
- Si los MOSFET 2 y 3 están activos, la corriente circula por la bobina e A- a A+, produciéndose un cambio de dirección en el campo magnético.

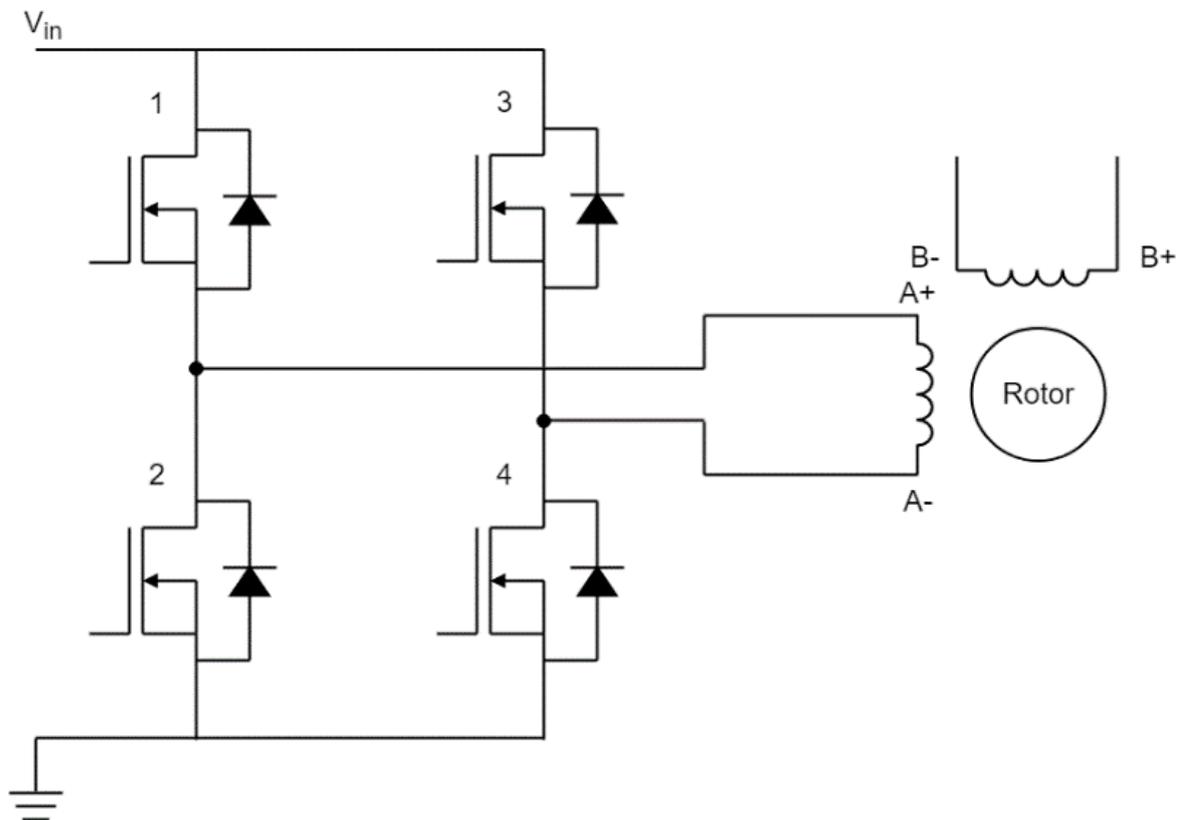


Ilustración 29. Puente en H

(*Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS, s. f.*)

3.2.6. Técnicas de control

Existen diferentes técnicas para controlar un motor paso a paso cuya finalidad es lograr una característica de funcionamiento deseada (normalmente aumentar la precisión):

3.2.6.1. Wave mode

Wave mode o bobina simple consiste en activar una única bobina cada vez:

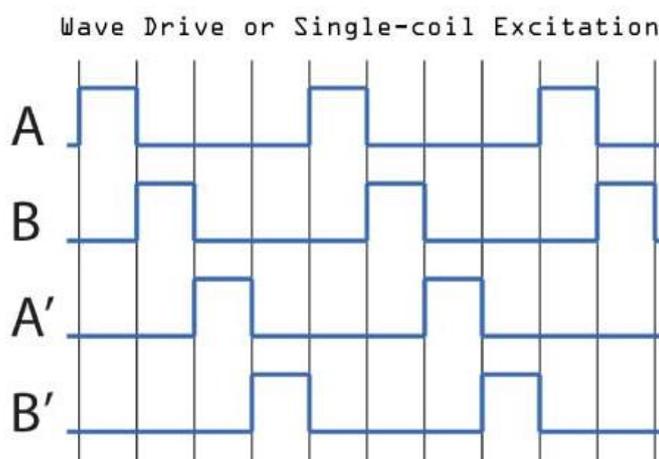


Ilustración 30. Wave mode ondas

(Dejan, 2015)

Esto hace que en cada paso el rotor esté completamente alineado con la dirección del campo magnético generado:

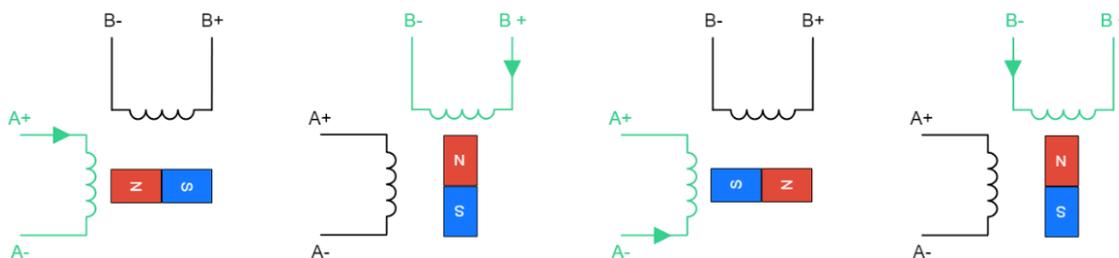


Ilustración 31. Wave mode pasos

(Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS, s. f.)

3.2.6.2. Full-step mode

Full-step mode o paso completo consiste en que siempre hay 2 fases activadas a la vez. Siempre que se desactiva una fase se activa otra.

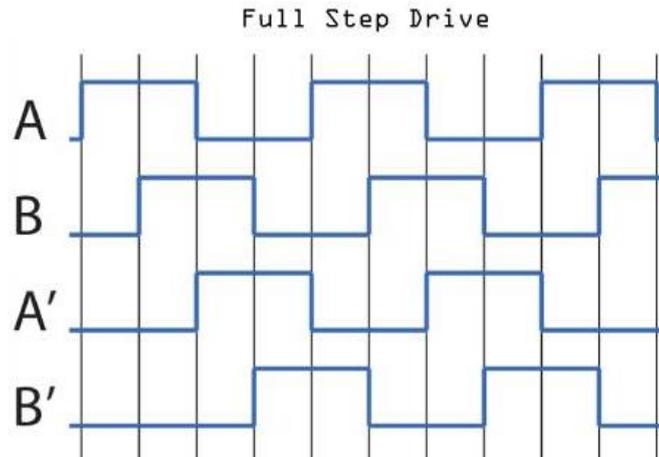


Ilustración 32. Full-step mode ondas

(Dejan, 2015)

Esto hace que se generen dos campos magnéticos iguales simultáneamente. El campo magnético resultante hace que el rotor en cada paso se oriente exactamente a la posición intermedia entre los dos campos magnéticos iniciales:

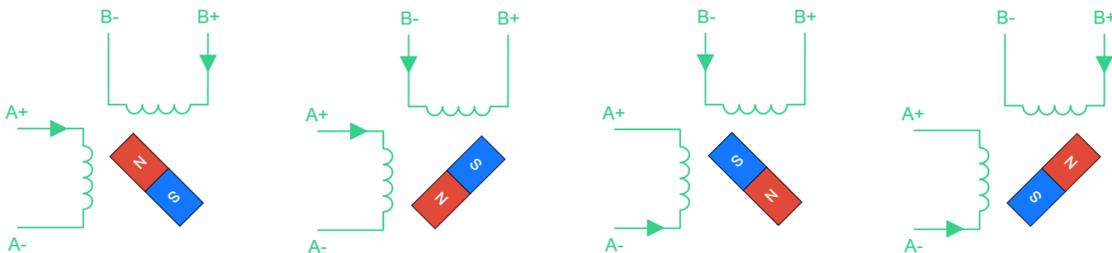


Ilustración 33. Full-step mode pasos

Esta técnica se utiliza para aumentar el torque del motor, pero no aumenta la precisión (*Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS, s. f.*).

3.2.6.3. Half-step mode

Half-step mode o medio paso es una técnica que consiste en una combinación de las dos anteriores. De tal forma que se alternan entre una fase y dos fases activas:

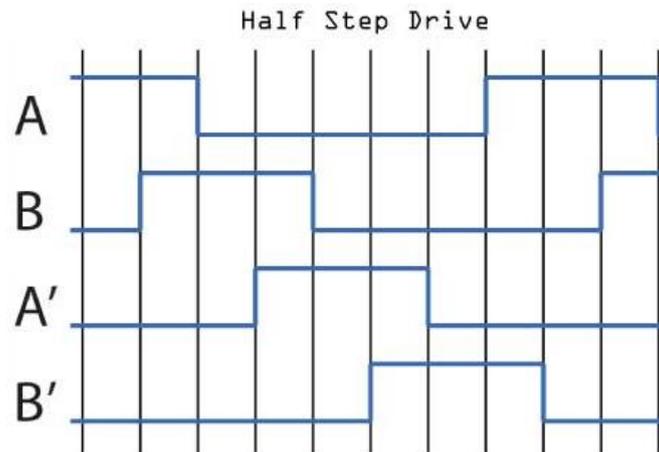


Ilustración 34. Half-step mode ondas

(Dejan, 2015)

Debido a esto, el rotor puede dar todos los pasos correspondientes a la técnica wave mode (alineación con el campo magnético de cada bobina) y full-step mode (posiciones intermedias):

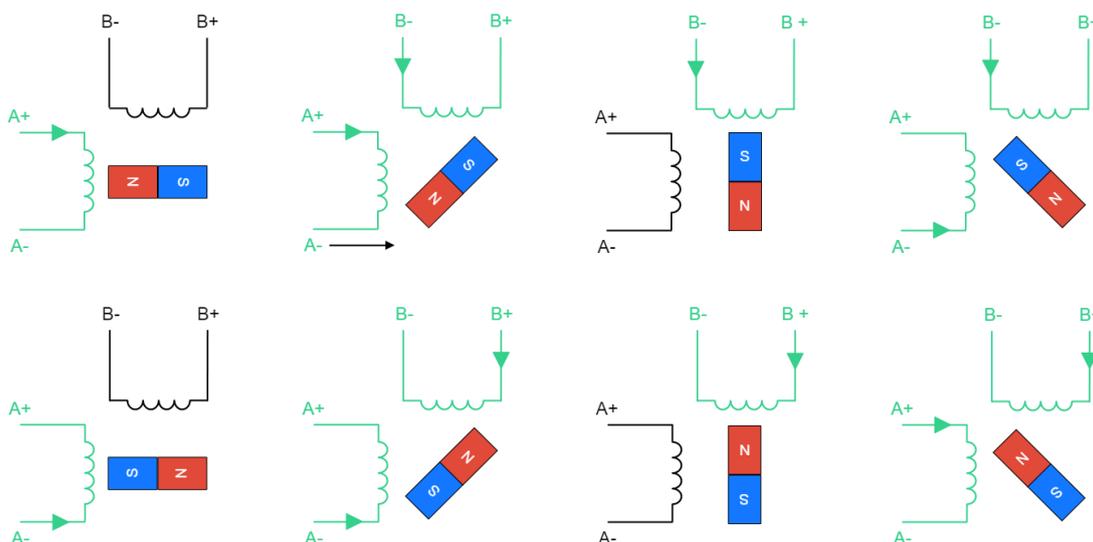


Ilustración 35. Half-step mode pasos

Por tanto, se obtienen el doble de posiciones posibles. Esta técnica permite obtener el doble de resolución del motor (*Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS*, s. f.).

3.2.6.4. Microstepping

La técnica de microstepping o de micropasos consiste en suministrar a las bobinas una corriente variable y controlada en forma de media onda sinusoidal:

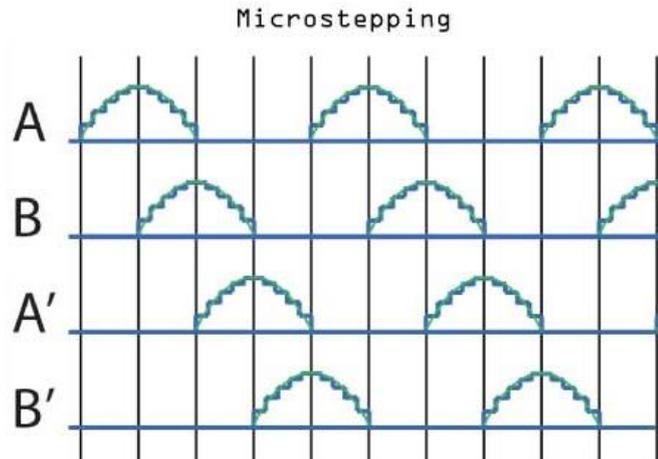


Ilustración 36. Microstepping ondas

(Dejan, 2015)

Al controlar el suministro de corriente eléctrica a cada fase, un nivel de intensidad distinto en cada una produce dos campos magnéticos de forma simultánea, pero de distinta intensidad. Esto hace que el rotor se alinee con el campo magnético resultante. Consecuentemente, se orienta a una posición intermedia entre los dos campos magnéticos iniciales. Sin embargo, no se sitúa exactamente en la mitad como sucedía con half-step mode, sino que se orienta más hacia una u otra fase según cuál genere un campo magnético más fuerte.

Controlando los niveles de intensidad de corriente eléctrica de cada bobina, se pueden crear un conjunto de posiciones intermedias entre dos pasos del motor. Cada una de estas posiciones intermedias o divisiones de paso se conocen como micropasos.

A continuación, se presenta el ejemplo de un motor paso a pasos controlado empleado la técnica de microstepping, con 3 micropasos por cada paso del motor:

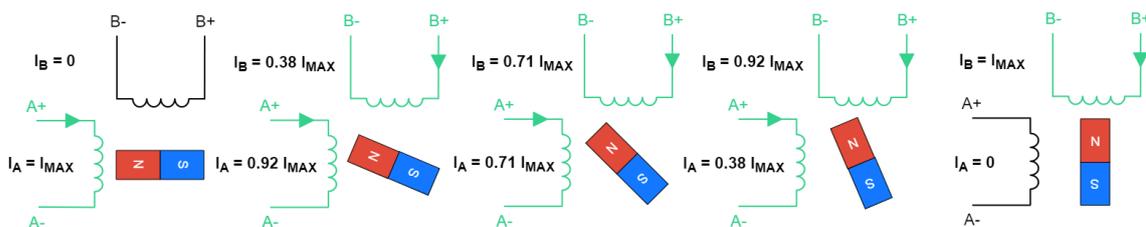


Ilustración 37. Microstepping ejemplo micropasos

Marco teórico

Tabla 6. Microstepping ejemplo valores

Corriente Bobina A	Corriente Bobina B	Ángulo del rotor
$I_A = I_{MAX}$	$I_B = 0$	0°
$I_A = 0,92 \cdot I_{MAX}$	$I_B = 0,38 \cdot I_{MAX}$	$22,5^\circ$
$I_A = 0,71 \cdot I_{MAX}$	$I_B = 0,71 \cdot I_{MAX}$	45°
$I_A = 0,38 \cdot I_{MAX}$	$I_B = 0,92 \cdot I_{MAX}$	$67,5^\circ$
$I_A = 0$	$I_B = I_{MAX}$	90°

Como se puede ver, esta técnica aumenta la precisión del motor. Además, al haber una sucesión de posiciones intermedias, el "salto" entre paso y paso no es tan brusco, generándose un movimiento más suave (*Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS, s. f.*).

3.2.7. Desventajas de los motores paso a paso

Los motores pasos a paso son dispositivos mecánicos y por tanto están sujetos a ciertas limitaciones físicas como la necesidad de vencer las fuerzas que limitan su movimiento de varias formas, como el rozamiento o inercia. Estos factores, influyen en el funcionamiento del motor y se han de tener en cuenta de forma conjunta a la influencia de la duración y frecuencia de los pulsos eléctricos para poder controlarlo.

Esto se debe a que, el motor debe dar un paso completo antes de que se inicie la siguiente frecuencia de pulsos. De no ser así, ocasionado a una frecuencia de pulsos elevada, se pueden dar varios fenómenos indeseables:

- Puede que el motor no realice ningún movimiento.
- El motor puede comenzar a vibrar, pero sin llegar a girar.
- El motor puede girar de forma errática.
- El motor puede girar en el sentido contrario al deseado.

Para evitar estos efectos y obtener un arranque suave y preciso es recomendable comenzar empleando una frecuencia de pulsos baja e ir aumentándola gradualmente hasta alcanzar la velocidad máxima deseada, sin llegar a superar la máxima tolerada. Para cambiar el sentido de giro sería conveniente reducir gradualmente la velocidad de giro y luego cambiar el sentido de rotación (*Motores paso a paso, s. f.*).

3.3. ENCODER INCREMENTAL

Un encoder incremental es un dispositivo usado para convertir la posición angular de un eje a un código digital («Codificador rotatorio», 2020). Está formado por un foto-emisor, un foto-receptor y un disco óptico.

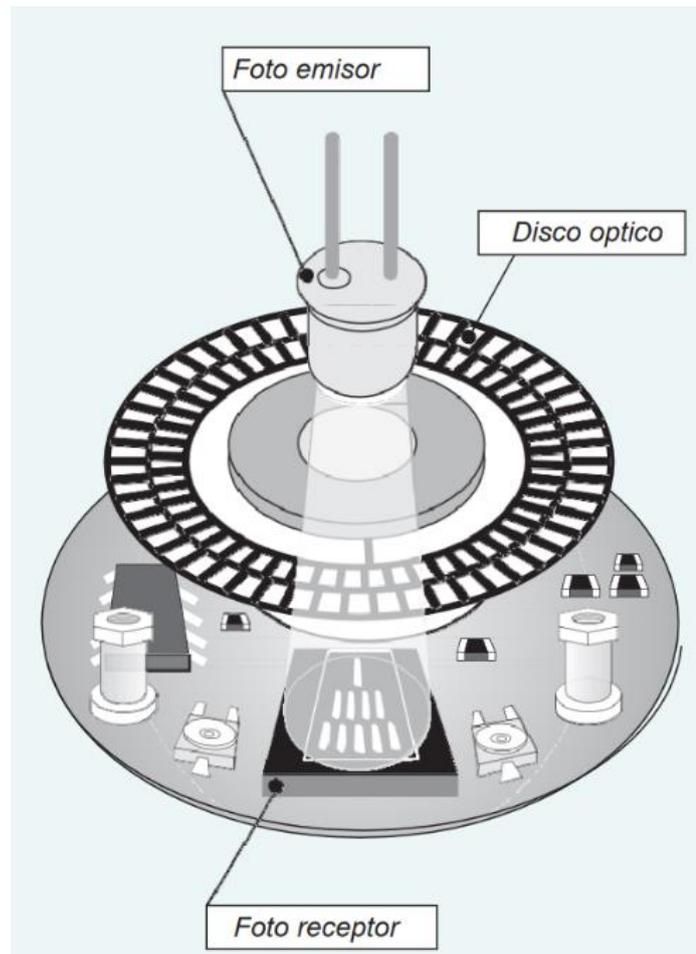


Ilustración 38. Encoder incremental

El funcionamiento de un encoder se basa en la rotación del disco óptico de forma solidaria al eje del motor cuya posición se desea conocer. El disco consta de zonas opacas, alternadas radialmente con zonas transparente. Sobre el disco incide perpendicularmente un haz de luz infrarroja generada por el foto-emisor que pasa a través de él según la posición de las zonas opacas y transparentes. Al otro lado del disco hay un conjunto de receptores (foto-receptor) que detectan las variaciones en la luz producidas por el giro del disco, dando lugar a una señal de impulsos digitales.

Marco teórico

Un encoder incremental proporciona generalmente dos formas de ondas cuadradas desfasadas entre sí en 90° eléctricos. Estas ondas normalmente se designan como "canal A" y "canal B", de las cuales se puede extraer información sobre el giro del eje del motor:

- La lectura de un solo canal proporciona información sobre la velocidad de rotación al observar la frecuencia de la onda cuadrada.
- Si se leen los dos canales, al encontrarse sus ondas desfasadas, observando la relación de desfase entre las dos señales es posible determinar el sentido de la rotación.

En algunos casos, un encoder incremental también proporciona una señal llamada "canal Z" o "canal 0", que proporciona la posición absoluta de cero del eje del encoder. Esta señal se presenta bajo la forma de impulso cuadrado con fase y amplitud centrada en el canal A:

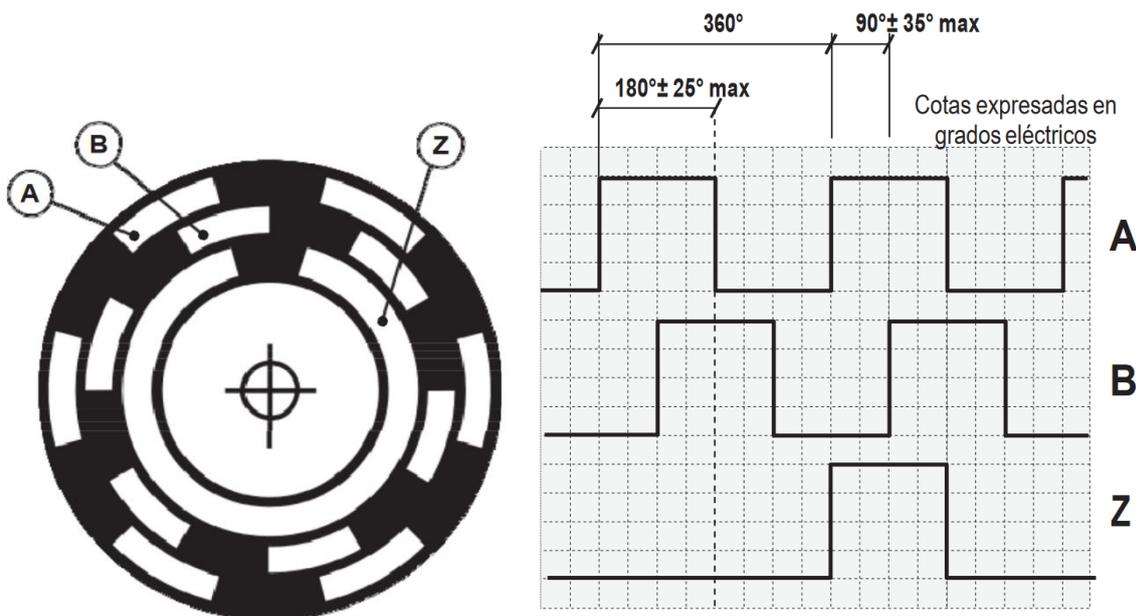


Ilustración 39. Disco óptico

Ilustración 40. Señales incrementales

4. DISEÑO

Para llevar a cabo la mejora del sistema de control de posición de la máquina de corte y grabado láser, es necesario diseñar una propuesta en la que se planteen las modificaciones que se van a realizar para que las nuevas características de la máquina se adapten a las necesidades de funcionamiento deseadas.

Por este motivo, es necesario determinar qué propiedades han de tener los componentes de los que consta la máquina para que, en conjunto, su funcionamiento sea el adecuado. De esta forma, al conocer las características de los componentes, se puede determinar cuáles de los que hay actualmente se pueden conservar, cuáles se han de reemplazar y las especificaciones del nuevo elemento; o si es necesario añadir alguna pieza más para lograr algún aspecto concreto de la funcionalidad.

Habiendo clarificado la información anterior, se procede a la elección de los nuevos componentes comerciales a incorporar a la máquina. Conociendo sus especificaciones técnicas y su funcionamiento, se puede estudiar su implementación en la máquina, cómo se relacionan unas piezas con otras y cómo afectan cada uno al funcionamiento global de sistema. Consecuentemente, es necesario realizar una parte de diseño para establecer las adaptaciones necesarias que se han de hacer en las piezas y en el sistema para que su desempeño sea el buscado.

Como la propuesta de mejora se centra en el sistema de control de posición, no es necesario plantear ningún diseño para el sistema del láser. Únicamente es necesario analizar las modificaciones que se han de realizar sobre los componentes de la parte mecánica del sistema, el diseño de su electrónica de control y la adaptación del programa informático.

La parte del sistema de control de posición del láser que permite el movimiento son los motores paso a paso. Por este motivo, constituyen los primeros componentes que se han de analizar para determinar si sus propiedades son compatibles con el funcionamiento deseado de la máquina; o si es necesario buscar alternativas para reemplazarlos.

En función esta información, es posible deducir cómo han de ser la reductora, la electrónica de control (driver) y el codificador rotativo de posición (encoder) para el sistema de realimentación de posición. Conocidas sus especificaciones se establece cómo ha de ser el programa informático que permita el control del sistema resultante.

4.1. ESTUDIO SOBRE LA VIABILIDAD DE LOS MOTORES PASO A PASO

El factor fundamental que determina si el uso de los motores paso a paso instalados actualmente en la máquina es compatible con las características de funcionamiento que se pretenden conseguir es que si su empleo permite conseguir una precisión de una micra o superior en el posicionamiento del láser. Es decir, se debe analizar si manteniendo los motores actuales es posible conseguir una precisión en la posición de un $1\mu\text{m}$. Si esto no fuese posible, sería necesario plantear su sustitución por otro tipo de motores como motores síncronos o servomotores.

Para conocer si es posible una precisión de $1\mu\text{m}$ en la posición del haz de luz láser sobre la superficie de corte, hay que determinar cuánto es el menor desplazamiento lineal que se puede conseguir al accionar el motor. O, dicho de otra forma, determinar en cuánto desplazamiento lineal se traduce el menor ángulo de giro posible del motor. Al tratarse de motores paso a paso, este menor ángulo de giro posible viene determinado por el paso del motor.

Tomando lo anterior en consideración, se ha de tener en cuenta que los motores llevan acoplados una reductora, y que a la salida de la reductora se encuentra el sistema de engranaje-correa dentada que transforma el movimiento de rotación en desplazamiento. Tanto la reductora como el sistema de la correa influyen en cómo se realiza esta transformación. Sin embargo, al desconocerse las características del sistema de engranaje-correa dentada, no se sabe si existe algún parámetro de este que sea necesario tener en cuenta para establecer la relación matemática que caracteriza esta transformación. La única información que se dispone sobre esta relación de transformación procede de partes del código del programa (ver Anexo 3).

Otro factor a tener en cuenta es que, en los motores paso a paso, empleando algunos tipos controladores, se puede fraccionar cada paso del motor. De esta forma, es posible lograr que el motor dé una fracción de paso, lo cual produce una rotación con un ángulo menor al paso del motor.

Por lo explicado anteriormente, se sabe que la precisión que se puede obtener en la posición no depende únicamente del motor. Consecuentemente, para conocer que precisión se puede obtener, es necesario conocer cómo influyen el uso de una reductora o de un controlador sobre la misma.

4.1.1. Influjo de la reductora

Las reductoras acopladas a los motores tienen una ratio de reducción 50:1, lo cual produce una reducción en la velocidad de giro del sistema motor + reductora; haciendo que vaya 50 veces más despacio que el motor solo. Esto se consigue haciendo que por cada 50 giros del motor el sistema resultante gire una vez:

$$50 \text{ vueltas motor} = 1 \text{ vuelta sistema} \Rightarrow 1 \text{ vuelta motor} = \frac{1 \text{ vuelta sistema}}{50}$$

Los motores paso a paso de la máquina tienen un paso de $1,8^\circ$. Conociendo este dato, se puede determinar cuándo pasos debe dar el motor para completar una rotación completa:

$$\frac{360^\circ/\text{vuelta motor}}{1,8^\circ/\text{paso}} = 200 \text{ pasos/vuelta motor}$$

Sabiendo cuántos pasos por vuelta da el motor, y conociendo la equivalencia entre giros del motor y giros del sistema motor + reductora, es posible calcular cuántos pasos debe dar el motor para que el sistema resultante complete una vuelta:

$$\frac{200 \text{ pasos}}{1 \text{ vuelta motor}} = \frac{200 \text{ pasos}}{\frac{1 \text{ vuelta sistema}}{50}} = 10.000 \text{ pasos/vuelta sistema}$$

Es decir, el sistema motor + reductora equivale a un motor paso a paso de 10.000 pasos por vuelta. Conociendo esta relación de equivalencia, es posible calcular el paso del supuesto "motor resultante":

$$\frac{360^\circ/\text{vuelta sistema}}{10.000 \text{ pasos/vuelta sistema}} = 0,036^\circ/\text{paso}$$

Al haber determinado cuánto es el paso del motor resultante, se puede realizar una comparación con el paso del motor para establecer una relación de magnitud:

$$\frac{\text{paso motor}}{\text{paso motor resultante}} = \frac{1,8^\circ/\text{paso}}{0,036^\circ/\text{paso}} = 50$$

Como se puede apreciar, un paso del motor es 50 veces mayor que un paso del motor resultante formado por el sistema motor + reductora. Debido a la relación de proporcionalidad que existe entre el paso del motor y a cuánto desplazamiento lineal se traduce, se puede concluir que un paso del motor solo supone un desplazamiento 50 veces mayor que un paso del motor resultante:

$$\text{Relación desplazamiento/paso motor} = 50 \cdot \text{Relación desplazamiento/paso motor resultante}$$

Diseño

Como bien se ha explicado con anterioridad, el giro de un motor se puede traducir en el desplazamiento lineal que produce mediante una operación matemática. En la máquina, es el motor resultante del sistema motor + reductora el que transmite el movimiento sobre el sistema engranaje-correa dentada, produciéndose así el desplazamiento lineal. De esta forma, es posible establecer una relación de proporcionalidad entre el desplazamiento total producido y el número de pasos del motor resultante:

Desplazamiento total = N° pasos motor resultante · Relación desplazamiento/paso motor resultante

Sin embargo, los pasos de menor ángulo que los del motor solo propios del motor resultante se generan por la acción reductora. En realidad, cuando se transmiten impulsos eléctricos al sistema para generar el movimiento se está actuando directamente sobre el motor real. Internamente, los pasos que se dan son los del motor solo, no los pasos teóricos del motor resultante. Por tanto, la relación matemática entre pasos y desplazamiento total debe establecerse empleando el número de pasos del motor real. Consecuentemente, debe cambiarse la relación de proporcionalidad de la fórmula anterior; sabiendo que el desplazamiento por paso del motor es 50 veces mayor que el desplazamiento por paso del motor resultante:

$$\text{Desplazamiento total} = \text{N}^\circ \text{ pasos motor} \cdot \frac{\text{Relación desplazamiento/paso motor}}{50}$$

Comparando esta relación de transformación con la información disponible a lo largo del código del programa, se puede deducir que la relación de desplazamiento por paso de motor es de 0,3756 mm/paso; como se puede apreciar en las siguientes líneas de código (ver Anexo 3):

```
frmPrincipal.txtXSec.Text = Format(CStr(Val(posX) * 0.3756 / 50), "0.0")  
' devuelve la posición en mm  
frmPrincipal.txtYSec.Text = Format(CStr(Val(posY) * 0.3756 / 50), "0.0")  
' devuelve la posición en mm
```

A partir de todo lo anterior se puede concluir que el valor "50" que aparece en la relación de transformación entre número de pasos de motor y desplazamiento lineal se debe al valor de la ratio de reducción introducida al acoplar la reductora. Consecuentemente, la relación de transformación de pasos a desplazamiento lineal para los motores de la máquina, expresada independientemente de la reductora queda de la siguiente forma:

$$\text{Desplazamiento total (mm)} = \text{N}^\circ \text{ pasos motor} \cdot \frac{0,3756}{i}$$

Donde i es el factor de reducción que aplica la reductora

4.1.2. Influjo del driver

Aunque se desconoce la forma de las placas controladoras de los motores paso a paso de la máquina y el modelo de los drivers que incorporan, es posible analizar, de forma hipotética, como influyen al funcionamiento del sistema. Por este motivo, para realizar esta parte del estudio y facilitar la comprensión, se ha supuesto que se ha empleado un controlador que divide cada paso del motor en 16 fracciones de paso idénticas. Esto supone que el motor pasa a comportarse como otro de mayor cantidad de pasos. En este caso un total de 16 veces más pasos por vuelta:

$$200 \text{ pasos/vuelta} \cdot 16 \text{ fracciones de paso/paso} = 3.200 \text{ fracciones de paso/vuelta}$$

Consecuentemente, empleando un driver de estas características, el sistema se comporta como un motor cuyo valor ángulo de giro es una 16ª parte del ángulo por paso del motor sin dicho controlador:

$$\frac{1,8^\circ/\text{paso}}{16 \text{ fracciones de paso/paso}} = 0,1125^\circ/\text{paso}$$

Por tanto, el desplazamiento lineal que se genera cuando el motor da una fracción de paso es un 16º del desplazamiento lineal que se da cuando el motor avanza un paso completo:

$$\text{Relación desplazamiento/paso motor} = \frac{1}{16} \cdot \text{Relación desplazamiento/fracción paso motor}$$

Conociendo la relación matemática entre desplazamiento lineal y el número de pasos para los motores de la máquina (obtenida en el apartado anterior). Se puede concluir que el emplear el driver de 16 fracciones por paso, afecta a dicha expresión de la siguiente manera:

$$\text{Desplazamiento total (mm)} = \text{N}^\circ \text{ fracciones paso motor} \cdot \frac{0,3756}{i} \cdot \frac{1}{16}$$

A partir de todo lo anterior, es posible deducir que, la expresión matemática que relaciona el total de fracciones de paso avanzadas por uno de los motores de la máquina con el desplazamiento lineal producido; independientemente del tipo de driver empleado, es la siguiente:

$$\text{Desplazamiento total (mm)} = \text{N}^\circ \text{ fracciones paso motor} \cdot \frac{0,3756}{i \cdot d}$$

Donde d es la cantidad de divisiones por paso creadas al emplear el driver.

4.1.3. Resultado del estudio

La precisión que se obtienen en posicionamiento del haz de luz laser sobre el plano de la superficie de corte es el menor desplazamiento lineal que se puede obtener al accionar uno de los motores paso a paso. Por tanto, la precisión del sistema se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Precisión} = \frac{0,3756}{i \cdot d} \text{ mm} = \frac{3,756 \cdot 10^{-4}}{i \cdot d} \text{ m}$$

A partir de esta expresión, es posible determinar la precisión que se obtiene en una dirección del sistema actual, que consta de una reductora con una ratio 50:1 ($i=50$) y un driver que no realiza divisiones en los pasos ($d=1$):

$$\text{Precisión actual} = \frac{3,756 \cdot 10^{-4}}{50 \cdot 1} \text{ (m)} = 7,512 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 7,512 \mu\text{m}$$

Esto supone que la precisión de la máquina actual para el posicionamiento del láser es inferior a la micra deseada ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$). Empleando este dato como condicionante, se determina cuanto debe ser el producto de i por d para que el sistema cumpla los requerimientos:

$$10^{-6} = \frac{3,756 \cdot 10^{-4}}{i \cdot d} \Rightarrow i \cdot d = 375,6$$

En conclusión, para que el uso de los motores paso a paso instalados actualmente en la máquina sea compatible con las especificaciones requeridas de funcionamiento, deben permitir obtener una precisión de una micra ($1\mu\text{m}$) o superior en el posicionamiento del láser sobre el plano de la superficie de corte. Para que esto sea posible, deben emplearse conjuntamente a una combinación de reductora y driver cuyos valores de factor de reducción (i) y de número de divisiones por paso (d) den un producto mayor o igual a 375,6.

$$i \cdot d \geq 375,6$$

Por tanto, el uso de los motores paso a paso se considera viable y se va a optar por su conservación para la propuesta de mejora. Consecuentemente, esto supone que quedan descartadas las posibles alternativas como motores síncronos o servomotores.

Por otra parte, al tener el sistema actual menor precisión de la deseada, la decisión de mantener los motores implica la necesidad de plantear una nueva combinación de reductora y driver que permitan alcanzar la precisión deseada; además de la correspondiente parte de diseño.

4.2. PROPUESTA DE MEJORA

Una vez se ha confirmado que el modelo del motor actual se puede mantener para la mejora de la máquina; partiendo de sus especificaciones técnicas y, habiéndose determinado los diferentes factores que puedan condicionar las características de funcionamiento, es posible concluir cuáles son las distintas modificaciones que se han de realizar en la máquina, cómo desempeñarlas y, si fuese necesario, qué propiedades deben tener los nuevos componentes que sea necesario incorporar.

De esta forma, conociendo las relaciones entre los distintos componentes, se puede concluir que plantear una mejora este es el mejor orden de actuación:

1. Determinar si es necesario cambiar la reductora y, en caso de serlo, seleccionar una ratio de reducción adecuada a la aplicación.
2. A partir de la ratio de reducción y aplicando la relación entre el factor de reducción y el número de micropasos, plantear cuántos micropasos por paso debe ser capaz de generar el nuevo driver que se ha de escoger.
3. Conociendo el número de micropasos, determinar cuántos impulsos por vuelta debe ser capaz de producir el encoder que se ha de implementar para disponer de un sistema de realimentación de posición; además de qué características debe tener.
4. Analizar si es necesario diseñar piezas mecánicas que sean necesarias para poder acoplar correctamente motor, encoder y reductora entre sí.
5. Plantear las posibles modificaciones que se han de realizar sobre la electrónica de la máquina para poder incorporar los nuevos componentes adecuadamente.

4.2.1. *Análisis de la reductora*

Ante la cuestión de si es necesario cambiar la reductora, es necesario determinar si la reductora actual es posible combinarla con un driver de micropaso comercial para cumplir la relación $i \cdot d \geq 375,6$.

Esta relación se puede cumplir fácilmente con una reductora con una ratio de reducción de 50 como es el caso. Por este motivo, y aplicando el principio de mantener en la medida de lo posible los componentes de la máquina para reducir costos, se considera más adecuado mantener la reductora actual. De esta forma cumplir la relación únicamente depende del controlador de micropasos.

4.2.2. Cambio del driver

Como se ha explicado anteriormente, se desconocen los detalles de la electrónica de control actual de los motores salvo que no emplea la técnica de micropasos. Sin embargo, conocer los detalles del driver actual resulta irrelevante ya que, para cumplir los requisitos de mejora es necesario emplear un controlador de micropaso. Consecuentemente, el driver actual va a ser reemplazado independientemente de su modelo.

En lo que se refiere al nuevo driver, el factor principal que va a determinar la elección de un determinado modelo comercial es si la cantidad de micropasos que proporciona sirve para la aplicación. Por este motivo, es necesario calcular este valor aplicando $i \cdot d \geq 375,6$. Sin embargo, como los valores de micropasos normalmente son potencias de 2, es preferible operar empleando números redondos:

$$i \cdot d \geq 400$$

$$50 \cdot d \geq 400 \Rightarrow d \geq \frac{400}{50} \Rightarrow d \geq 8$$

De esta forma, se ha podido determinar que el nuevo driver que ha de incorporar la máquina debe ser capaz de proporcionar como mínimo 8 micropasos por paso del motor.

4.2.3. Características del encoder

El encoder que se ha de implementar en la máquina será adecuado según dos factores fundamentalmente: Si es capaz de generar un número suficiente de impulsos por vuelta del eje del motor y si es posible acoplarlo al motor.

El número de impulsos se puede calcular fácilmente conociendo el número de pasos del motor y los micropasos que introduce el driver:

$$\text{Nº de impulsos} = \text{Nº de pasos del motor} \cdot \text{Nº de micropasos} = 200 \cdot 8 = 1.600$$

Al ser necesario acoplarlo a un motor paso a paso cuya carcasa no se puede desmontar y que además el motor dispone de un único eje, se puede concluir que el encoder debe situarse en torno al eje del motor permitiendo que pase de lado a lado del mismo para que sea posible acoplarlo a la reductora. Por este motivo, se deduce que el tipo de encoder adecuado para esta aplicación es uno de eje hueco pasante.

4.2.4. Acoplamientos

Según se ha podido observar en el catálogo de los motores paso a paso y el manual de la reductora (ver Anexo 4), para afianzar la unión entre estos elementos y asegurar un buen amarre, se han de emplear cuatro tornillos en los agujeros que tanto motor como reductora incorporan por defecto. Sin embargo, también se ha observado que, debido a tratarse de componentes de distintos fabricantes y a la diferencia de dimensiones entre motor y reductora, los agujeros de los tornillos no se encuentran alineados.

Observando las fotografías de la máquina (ver Anexo 1), se ha localizado una pieza de aluminio mecanizada en taller para lograr el acoplamiento entre motor y reductora empleando tornillos. Aunque esta pieza sea de utilidad en la situación actual de la máquina, se debe considerar que se va a incorporar un encoder entre motor y reductora; por lo que es posible que esta pieza no sea aprovechable en la mejora.

Además, se ha de tener en cuenta que se desconocen las dimensiones de esta pieza y que la incorporación de un encoder puede cambiar radicalmente cómo se han de amarrar motor, encoder y reductora entre sí. Adicionalmente, se ha observado que debido a la poca longitud del eje del motor (apenas 3 cm) y a que el encoder se va a situar en torno a él, es probable que haya que desarrollar un sistema que, adicionalmente a los acoplamientos, permita la transmisión del movimiento del eje del motor a la reductora a través del encoder.

Por estos motivos, se considera que lo más adecuado es desechar esta pieza de aluminio y reemplazarla por un conjunto de piezas mecánicas que se fabriquen en taller que hagan de soporte del motor y que hayan sido diseñadas específicamente para poder acoplar el motor, el encoder y la reductora entre sí.

De estos conjuntos soporte del motor sólo interesan que sean funcionales. Son piezas que se van a fabricar en taller de las cuales no importan detalles como acabados y tolerancias. La única característica relevante de estos conjuntos es que permitan acoplar correctamente los componentes entre sí.

Adicionalmente a esto, por mantener cierto grado de homogeneidad con el resto de los componentes y, puesto que ya ha demostrado ser eficaz, se cree que el aluminio es adecuado para las piezas del conjunto. Además, no se considera relevante realizar un proceso de cálculo de estructuras y, al igual que sucede con la pieza actual, se van a sobredimensionar las piezas a diseñar dentro de unos límites razonables.

4.2.5. Modificaciones electrónicas

Como se ha descrito previamente, la máquina actual consta de dos placas que aglutinan toda la electrónica de control para controlar cada uno de los motores. Al ser necesario cambiar los drivers, estas placas pierden toda utilidad, por lo que será necesario diseñar desde cero los circuitos electrónicos que permitan el empleo de estos drivers.

Otro componente que afecta a la electrónica son los encoders. La salida de los encoders se debe conectar al módulo de control de la máquina para poder leer las señales. Sin embargo, se ha de tener en cuenta la posibilidad de que sea necesario un circuito electrónico para adaptar las señales del encoder y que puedan ser interpretadas por el módulo de control.

Esto plantea un problema, y es que es posible que sea necesario incorporar a la máquina un circuito electrónico independiente a los circuitos de control de motor. Además, el hecho de emplear drivers de micropaso y encoders, incrementa considerablemente el número de conexiones entre las placas electrónicas y el módulo de control.

También se debe tomar en consideración que se desconocen las características del módulo de control que hace de interfaz entre la electrónica de la máquina y el ordenador. Se desconocen las implicaciones que puedan derivarse de su uso. Por este motivo, es probable que sea más adecuado reemplazarlo por un módulo de microcontrolador cuyo funcionamiento pueda conocerse y que suponga mayor facilidad de uso.

El hecho de emplear un microcontrolador implica la necesidad de diseñar también su circuito electrónico correspondiente; lo cual supone otro circuito electrónico más. Por este motivo se considera más adecuado diseñar una única placa de circuito impreso (PCB) que aglutine toda la electrónica: los circuitos de los 2 drivers, los circuitos de los encoders y el circuito del microcontrolador.

De esta forma, no solo se simplifica la etapa de diseño que se desarrollará más adelante, sino que se reducen el número de PCBs en la máquina y el número de conexiones y cables entre los distintos componentes. Al encontrarse los circuitos conectados entre sí en la propia PCB, las únicas conexiones que parten de la placa son las de los motores, los propios encoders y un único cable USB que sirve de comunicación entre microcontrolador y ordenador por puerto serie.

4.2.6. Diagrama de bloques de la propuesta de mejora

Una vez concluidas las distintas modificaciones que se van a realizar en la máquina y cómo se van a desarrollar, es posible plantear un nuevo diagrama de bloques (ver Anexo 2) que representa de forma esquemática la estructura de la máquina resultante tras llevar a cabo las mejoras que se pretenden realizar:

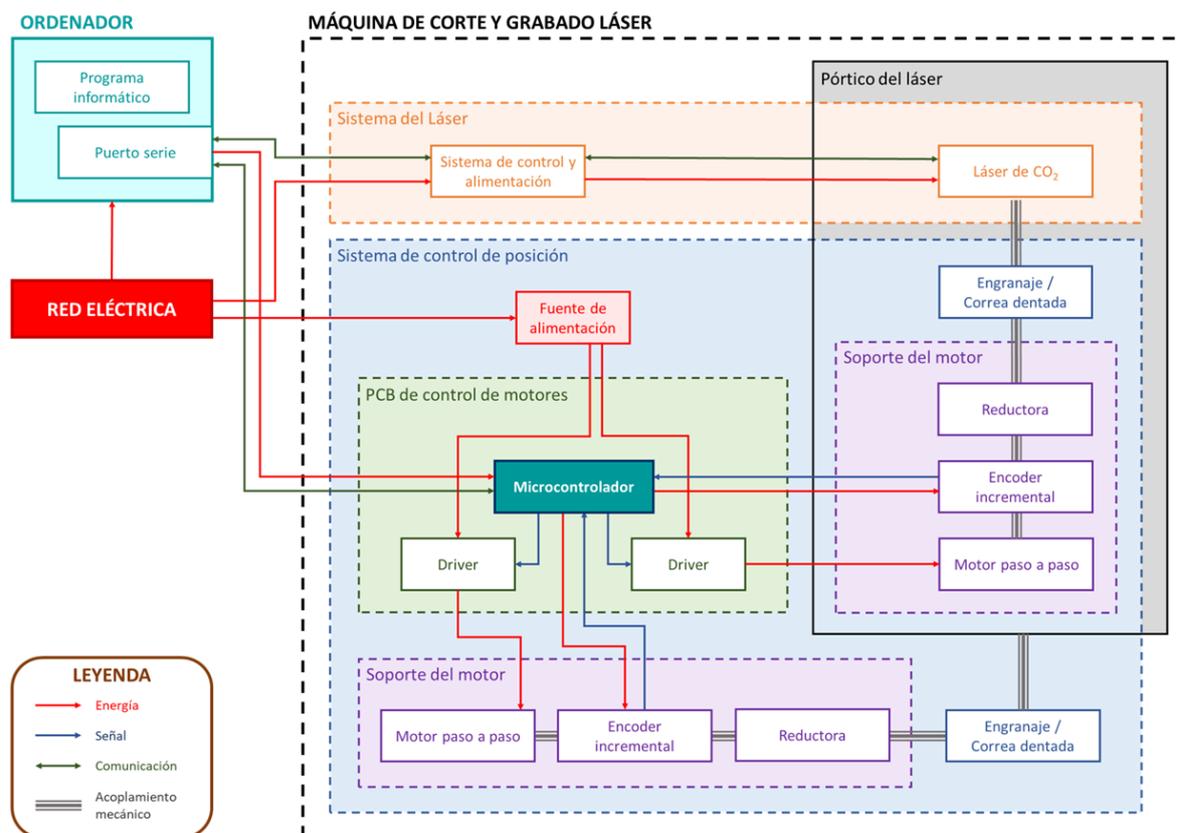


Ilustración 41. Diagrama de bloques de la propuesta de mejora

Adicionalmente, de forma resumida, se ha determinado la siguiente información sobre los nuevos componentes que se van a incorporar a la máquina:

- Encoder incremental de eje hueco pasante de como mínimo 1.600 impulsos por giro del eje del motor.
- Controlador (driver) de 8 micropasos por cada paso del motor.

4.3. DESARROLLO DE LA PROPUESTA DE MEJORA

4.3.1. Implementación del encoder

4.3.1.1. Encoder escogido

El encoder escogido para esta aplicación es un encoder incremental del fabricante Hohner Automaticos S.L., en concreto el SERIE 77 (páginas del catálogo disponibles en el Anexo 4). Esta elección queda justificada por lo siguiente:

- Se trata de un encoder incremental de eje hueco pasante.
- Una de las opciones de la lista de números de impulsos disponibles es 1.600
- El eje hueco está disponible en diámetros superiores al diámetro del motor, siendo el valor máximo posible 25mm; por lo que pueden acoplarse.



Ilustración 42. Encoder Hohner SERIE 77

A parte de esta información, se conocen estas otras características que pueden ser relevantes para implementar este modelo de encoder en el sistema, tanto a nivel electrónico como mecánico.

4.3.1.1.1. Cableado del encoder

En lo que se refiere a las características del encoder que pueden afectar al diseño de la electrónica, el factor más relevante es cómo se debe conectar al sistema, qué alimentación se debe suministrar y qué señales se obtienen.

Gracias al catálogo se sabe que este modelo de encoder requiere una alimentación de entre 5 y 30 V de continua. Además de esto, la señal que proporciona el encoder se basa en el estándar de canal A, canal B y canal 0.

El conexionado del encoder se realiza mediante un único cable multifilar de tal forma que, cada uno de los hilos que van por su interior tiene una finalidad distinta:

Tabla 7. Conexionado del encoder

Hilo del cable	Función
Negro	GND
Rojo	Vcc
Amarillo	A
Verde	B
Marrón	A complementaria
Azul	B complementaria
Gris	0 (referencia)
Naranja	0 complementario

Conociendo esta información, se ha decidido que el conexionado se va a realizar crimpando los hilos del cable para poder conectarlos a la PCB que se diseñe mediante un conector tipo JST. Sin embargo, como se puede observar, para la aplicación no todos los hilos son relevantes; se pueden descartar las 3 señales complementarias. Por este motivo, estos 3 hilos se dejan sin conectar y se emplea un conector JST de 5 conexiones.

4.3.1.1.2. Dimensiones del encoder

En el catálogo del encoder se dispone de toda la información sobre las dimensiones del encoder y sobre cómo se amarra a los componentes existentes. De esta forma se sabe que se emplea un sistema de bridas antigiro que se atornillan al motor.

Cabe destacar que el sistema de amarre sólo realiza la unión entre motor y encoder, obviando la posibilidad de añadir una reductora. Además, las bridas se atornillan empleando únicamente 3 tornillos, por lo que no es posible alinear los tornillos del encoder con los agujeros del motor.

Adicionalmente, el encoder tiene un grosor superior a la longitud del eje del motor. Por lo que es necesario realizar una ampliación del eje para poder transmitir el movimiento a la reductora.

4.3.1.2. *Diseño del soporte del motor*

A raíz de la incompatibilidad de las uniones entre motor, encoder y reductora y al problema de la longitud insuficiente del eje del motor, se ha diseñado un conjunto de piezas que conforman un soporte para el motor y permite el acoplamiento del resto de componentes (ver planos en Anexo 5).

Este conjunto consiste en una estructura similar a una jaula en cuyos laterales opuestos se atornillan motor y reductora. En el interior de la estructura, va situado el encoder, atornillado al lado del motor, pero por el lado contrario. Para transmitir el movimiento del motor, se emplea una ampliación del eje; es decir, un eje de mayor tamaño que se acopla al existente y que permita salvar la distancia entre motor y reductora:

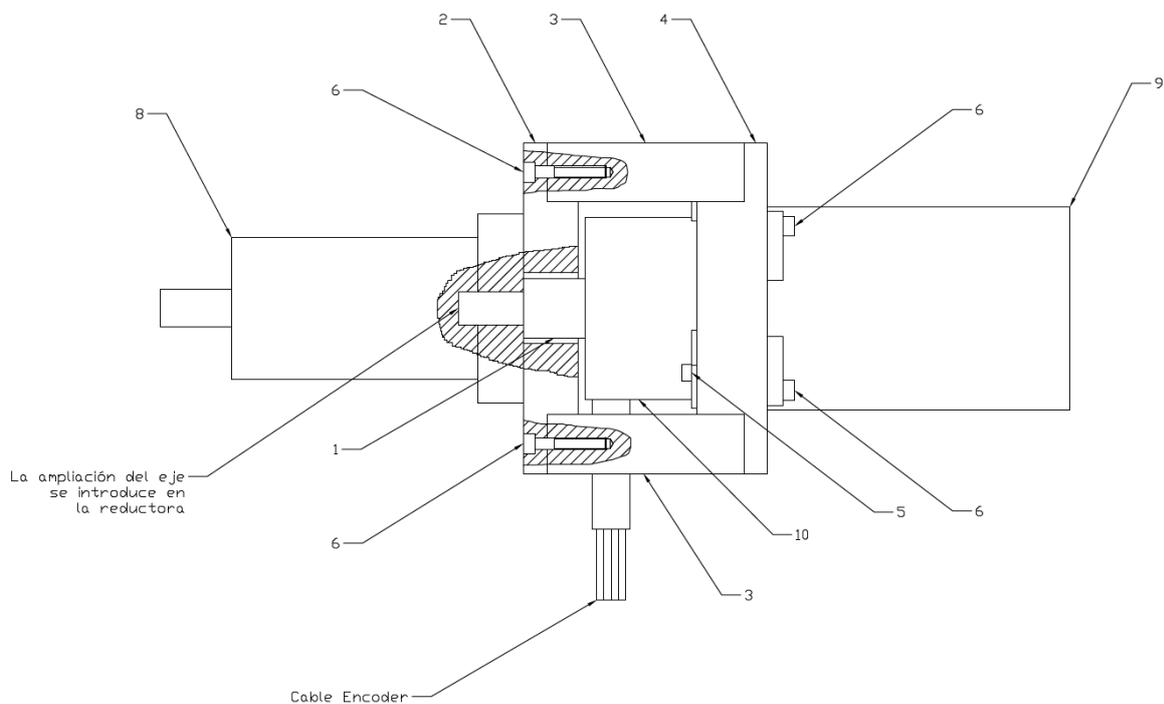


Ilustración 43. Soporte del motor

Cabe destacar que los tornillos que se planteados para poder realizar el montaje de la estructura, se han escogido en función de las recomendaciones presentadas por los catálogos y hojas de características de los componentes. De esta forma, se ha pretendido utilizar, en la medida de lo posible, el mismo tipo de tornillo en toda la estructura para que sean intercambiables entre sí, reducir problemas de compatibilidad y no haya lugar a posibles confusiones.

4.3.1.2.1. Orden de montaje

Debido a las características de los componentes que se han de montar en la estructura, es necesario realizar el montaje en un orden concreto (ver planos Anexo 5). De esta forma, para que sea posible ensamblar el conjunto, hay algunas piezas que se deben montar necesariamente antes que otras. De esta forma, aunque se pueda variar el orden de algunos puntos, esta es la secuencia que se ha establecido en los planos de montaje:

- Atornillar la pieza de acoplamiento a la reductora
- Incorporar la ampliación del eje al motor
- Atornillar el motor a la pieza diseñada para su acoplamiento
- Atornillar el encoder a la misma pieza de acoplamiento del motor por el lado contrario de forma que la ampliación del eje pase a través de él.
- Unir las piezas de acoplamiento del motor y acoplamiento de la reductora empleando las 4 piezas de unión. De esta forma la ampliación del eje se introduce en la reductora y el encoder queda aprisionado dentro de la estructura.

4.3.1.2.2. Ampliación del eje

Esta pieza consiste, esencialmente, en un eje de mayor tamaño que se acopla al eje del motor. La unión entre ambos elementos se realiza empleando la llave paralela o chaveta que incorpora el eje del motor por defecto:

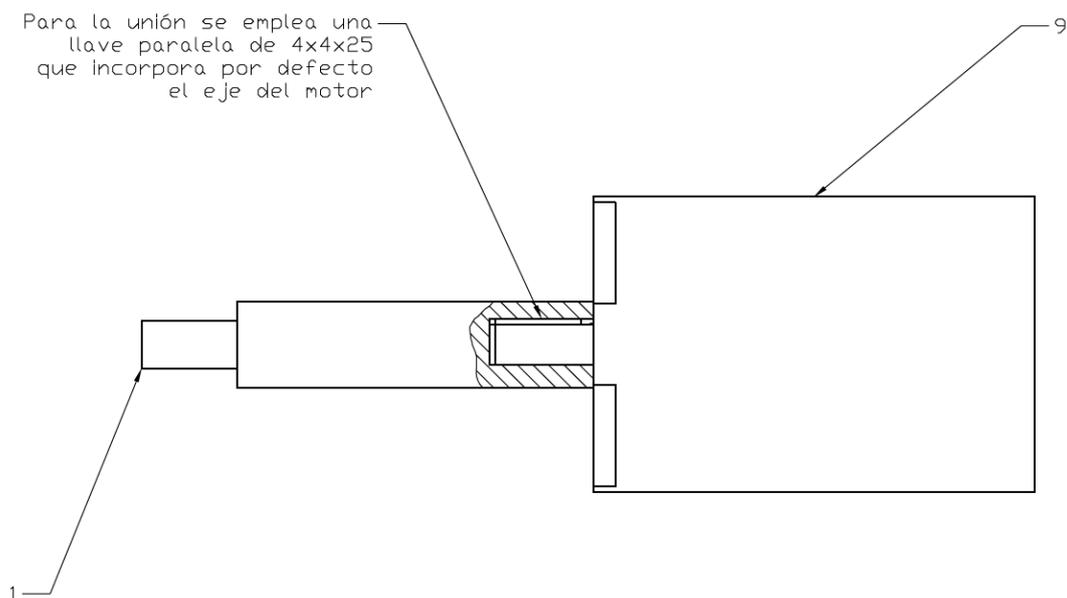


Ilustración 44. Ampliación del eje

4.3.1.2.3. Anclaje del encoder

Uno de los factores fundamentales por los que es necesario el soporte del motor es la necesidad de poder incorporar el encoder al sistema.

Como se ha explicado anteriormente, en el encoder se amarra al motor al atornillarlo a la pieza de acoplamiento del motor. De esta forma, el encoder queda a un lado de la pieza y el motor queda atornillado en el lado opuesto:

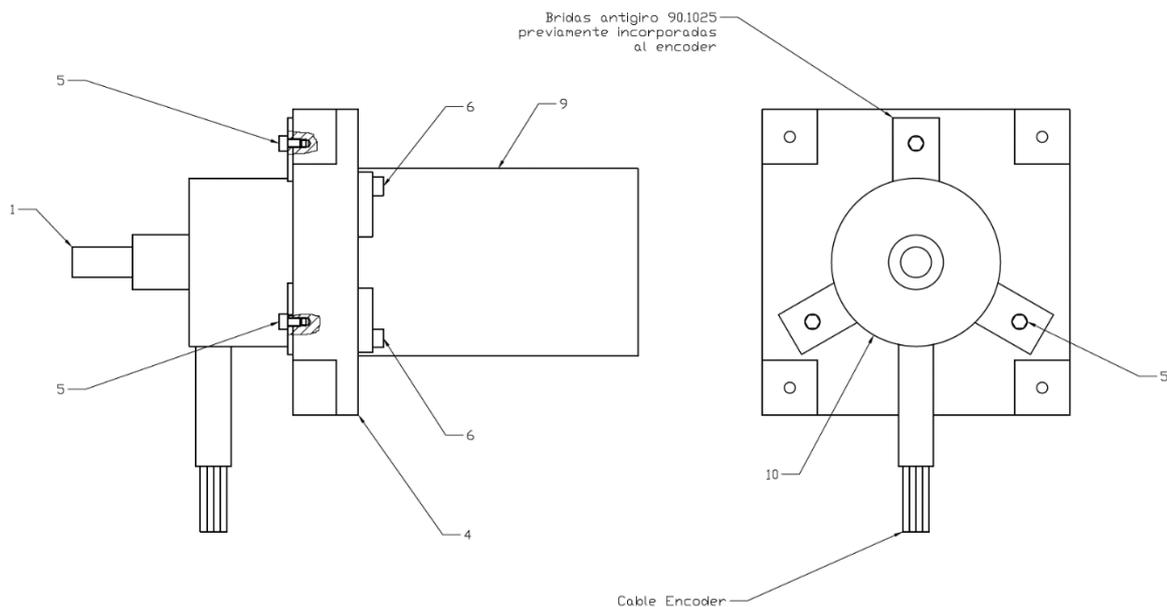


Ilustración 45. Anclaje del encoder

Para poder registrar el giro del motor, el encoder necesita recibir el movimiento del motor. Esto se realiza mediante la ampliación del eje. Esta pieza tiene un diámetro de 25mm en la parte que se sitúa el encoder; siendo este valor el máximo admisible para el encoder. Sin embargo, para que exista esta transmisión de movimiento, el eje del motor, la ampliación del eje y el eje hueco del encoder deben estar situados de forma concéntrica uso respecto a otros. Consecuentemente, aunque motor y encoder no estén en contacto directo entre sí, se encuentran unidos y el encoder puede registrar la posición del eje.

Otro factor referente al encoder que se ha considerado en el diseño es la necesidad de conectarlo a la PCB. Es decir, aunque el encoder se encuentre aprisionado dentro de la estructura, el cable debe poder salir de la misma. Este es uno de los motivos por los que se ha empleado esta estructura similar a una jaula. Así, el cable del encoder pasa sin problema entre las dos piezas de unión de la parte inferior del conjunto sin que haya problemas para unir el resto de las piezas y componentes entre sí.

4.3.2. Diseño de la electrónica de control

4.3.2.1. Elección de los componentes electrónicos

4.3.2.1.1. Driver

El driver del motor que se escoja para esta aplicación debe emplear la técnica de micropasos para obtener como mínimo 8 micropasos por cada paso del motor. Hay muchos drivers comerciales que cumplen estas características, siendo uno de los más destacables el circuito integrado DRV8825 de Texas Instruments (ver extracto del Datasheet en el Anexo 4):

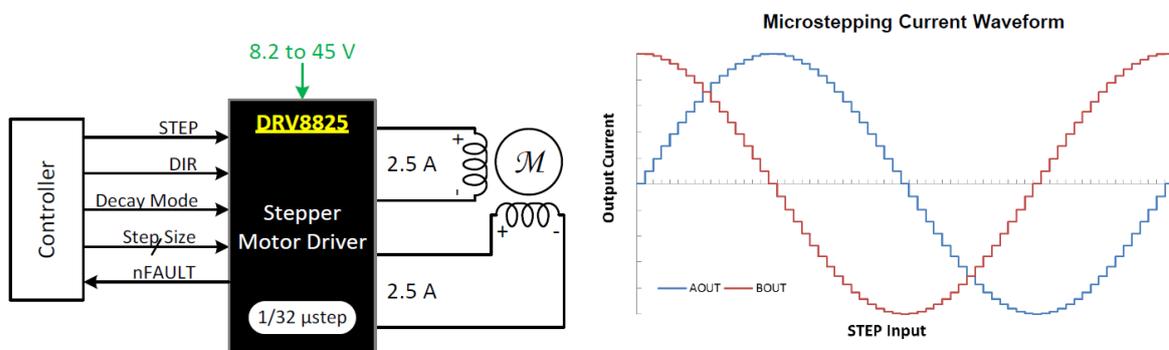


Ilustración 46. DRV8825

Este se trata de un driver cuyo funcionamiento se basa en el principio de un puente en H. De esta forma, cuenta internamente con 2 puentes en H para poder controlar las dos fases del motor paso a paso. Además, permite obtener hasta 32 micropasos por paso del motor, pudiendo configurarse para que de 8.

A pesar de todo esto, su uso plantea un problema: A la salida de este driver se obtiene como máximo una intensidad de corriente eléctrica de 2.5A, inferior a los 6A que requiere el motor paso a paso para su funcionamiento.

La consecuencia lógica de este problema sería plantearse el uso de un driver distinto que permita obtener los micropasos deseado y que cumpla las características de alimentación del motor. Sin embargo, no se ha encontrado ningún circuito integrado que cumpla los requisitos buscados.

Si bien es cierto que existen soluciones comerciales completas, decantarse por esta opción iría en contra del objetivo perseguido de diseñar una única PCB adaptada a las necesidades de la solución. Por tanto, la resolución del problema pasa por encontrar componentes electrónicos que combinados entre sí permitan llevar a cabo un control de 8 micropasos con una alimentación adecuada de los motores.

Diseño

Habiéndose analizado las diferentes posibilidades, se ha concluido que la mejor opción pasa por usar el driver DRV8874 de forma conjunta con el DRV8825.

El DRV8874, es un circuito integrado para control de motores cuyo funcionamiento consiste en un puente en H. Este driver admite 24V de alimentación y permite obtener hasta 6A en la salida para alimentar el motor (fragmento del Datasheet en Anexo 4):

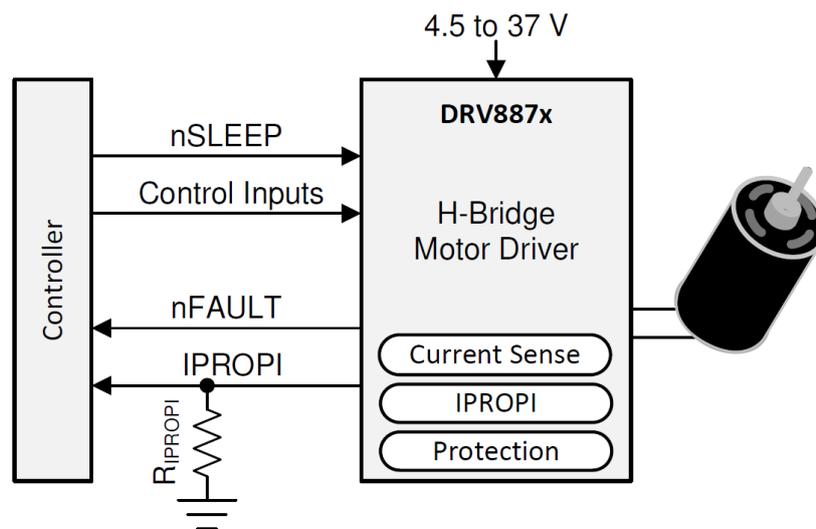


Ilustración 47. DRV8874

Aunque este driver no realice un control por micropasos tiene una característica muy interesante: Puede emplear las salidas de otros drivers como entradas lógicas para realizar el control del puente en H.

De esta forma, si se emplea un controlador de micropaso como el DRV8825, el DRV8874 hace de intermediario entre él y el motor. En vez de conectar las salidas del DRV8825 al motor, se conectan al DRV8874 y las salidas de este al motor.

Al emplear el DRV8825 como controlador del DRV8874, lo que se consigue es que éste lea sus salidas y las replique, pero empleando sus propias características de voltaje y corriente. Lee el comportamiento de uno de los puentes en H del DRV8825 y lo replica en su propio puente en H.

De esta forma, empleando conjuntamente los drivers DRV8825 y DRV8874, se consigue un control de micropasos con las características de alimentación apropiadas a los motores.

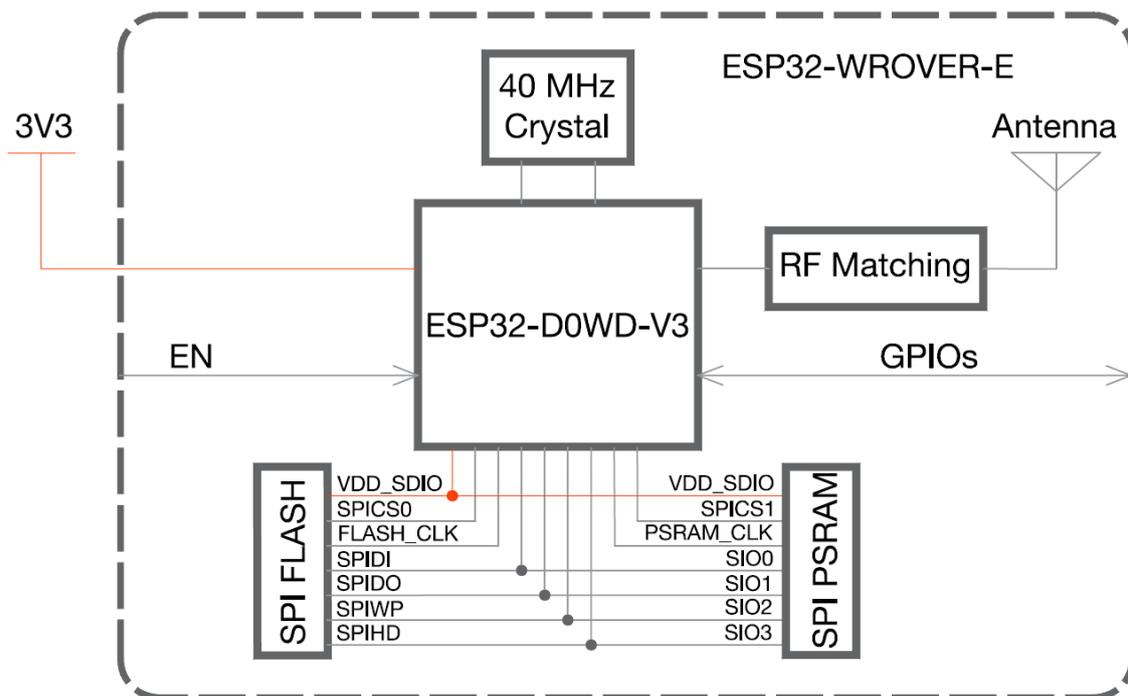
Cabe destacar que el DRV8874 sólo tiene un puente en H, por lo que se tienen que usar 2 por cada motor (uno por cada fase de un motor). Haciendo que, para controlar todo el sistema sean necesarios un total de dos DRV8825 y cuatro DRV8874.

4.3.2.1.2. Módulo de microcontrolador

Para reemplazar el módulo de control actual es necesario integrar un módulo de microcontrolador en la PCB a diseñar. De entre las distintas opciones disponibles, se ha decidido optar por un módulo ESP32 del fabricante Espressif Systems.

Se ha elegido un módulo ESP32 debido a su elevada capacidad y velocidad de procesamiento. Además, integran variedad de funcionalidades y suelen tener un mayor número de entradas y salidas, necesarias para poder conectar los drivers y los encoders.

De entre los distintos modelos, se ha optado por el ESP32-WROVER-E (ver extracto del Datasheet en Anexo 4) debido a que es dual core; es decir, posee dos núcleos y, por tanto, facilita la implementación de un programa que funcione empleando multitasking. Este módulo tiene el siguiente diagrama de bloques:



4.3.2.2. *Diseño de la PCB*

Antes de comenzar a diseñar la PCB para el control de los motores es necesario conocer con certeza los elementos comerciales que se van a incluir para poder desarrollar, a continuación, la circuitería necesaria para que el funcionamiento sea el correcto. De esta forma, hasta el momento, se han determinado que la PCB debe aglutinar los siguientes componentes:

- Un módulo ESP32-WROVER-E
- 2 drivers DRV8825
- 4 drivers DRV8874

Además de esto, también se pueden listar los conectores que necesita la PCB para poder conectar los componentes de la máquina y llevar a cabo el control:

- Un puerto micro-USB para conexión con el ordenador
- 2 conectores JST de 4 pines para la conexión los motores paso a paso
- 2 conectores JST de 5 pines para la conexión de los encoders
- 1 conector JST de 6 pines para la conexión de la fuente de alimentación

Se conoce la cantidad de pines de los conectores JST debido a que se sabe qué conexiones necesitan los distintos componentes para el correcto funcionamiento del sistema. De esta forma, es posible listar qué debe ir conectado a cada pin de los conectores JST para comprender cómo debe ser la PCB y cómo es la circuitería que debe emplearse.

Los motores paso a paso 103H8223-6340 de SANYO DENKI tiene 4 cables, 2 para cada fase del motor. Gracias a la información disponible en el catálogo (ver Anexo 4), se sabe que los pines del conector JST son los siguientes:

Tabla 8. Conector JST de 4 pines para un motor paso a paso

Cable del motor 1	Función
Naranja	Fase 1 +
Azul	Fase 1 -
Rojo	Fase 2 +
Amarillo	Fase 2 -

Como se ha explicado anteriormente, los encoders incrementales SERIE 77 de Hohner proporcionan más señales de las necesarias. Por este motivo, las señales complementarias se dejan sin conectar, haciendo que la distribución de los pines del conector JST sea la siguiente:

Tabla 9. Conector JST de 5 pines para un encoder

Hilo del encoder	Función
Rojo	Vcc
Amarillo	Canal A
Verde	Canal B
Gris	Canal 0 (referencia)
Negro	GND

La fuente de alimentación HUL300-14 de XP POWER suministra 24V. Sin embargo, tal como se ha explicado anteriormente, para esta aplicación también es relevante la intensidad; siendo necesario hacer llegar 6A a cada uno de los drivers DRV8874 para que alimentar los motores. Por este motivo, la PCB se conecta a 5 de las 7 salidas de la fuente. De esta forma una de las salidas sirve de alimentación de 24V y las otras 4 están dedicadas exclusivamente a alimentar cada uno de los 4 drivers:

Tabla 10. Conector JST de 6 pines para la fuente de alimentación

Salida de la fuente	Función
Output 1	24V
Output 1	Alimentación DRV8874
Return	GND

Diseño

4.3.2.2.1. Circuito del ESP32

El datasheet del módulo ESP32-WROVER-E (disponible en el Anexo 4), proporciona extensa información sobre su funcionamiento. Gracias a esta información, es posible diseñar un circuito electrónico que cumpla las funciones necesarias para que el funcionamiento del sistema sea el esperado.

Algunos de los factores más relevantes obtenidos que influyen en el diseño del circuito electrónico son los siguientes:

- Los pines IO34 e IO35 son sólo de entrada. Por este motivo en caso de que se vayan a emplear sólo sirven para leer señales.
- Los pines TXD0 y RXD0 se emplean para la comunicación con la interfaz del USB.
- Los pines IO0 e IO2 se emplean para "Booting mode". Esto significa que es deben polarizar correctamente para poder cargar un programa.
- Se necesita crear un circuito electrónico que permita generar automáticamente el reset del ESP32 al cargar un programa.

Teniendo en cuenta esta información, se ha diseñado el siguiente circuito electrónico (ver planos en Anexo 5):

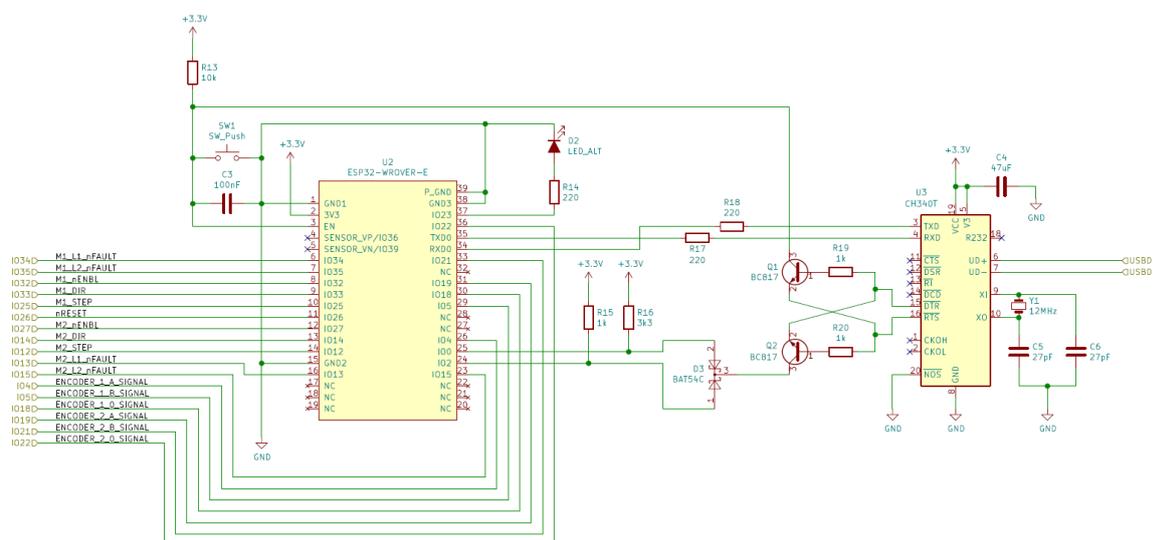


Ilustración 49. Circuito ESP32

Los pines digitales IO se emplean para la comunicación del ESP32 con el resto de los componentes del circuito. A su vez, el ESP32 está conectado a una interfaz de comunicación para poder transmitir y recibir información del ordenador mediante USB.

4.3.2.2.2. Circuito del DRV8825

El datasheet del DRV8825 no solo proporciona información sobre su funcionamiento, sino que también presenta un ejemplo de aplicación típica (ver extracto del datasheet en Anexo 4). Tomando este ejemplo y adaptándolo para las necesidades requeridas, se ha diseñado este circuito (ver planos en Anexo 5):

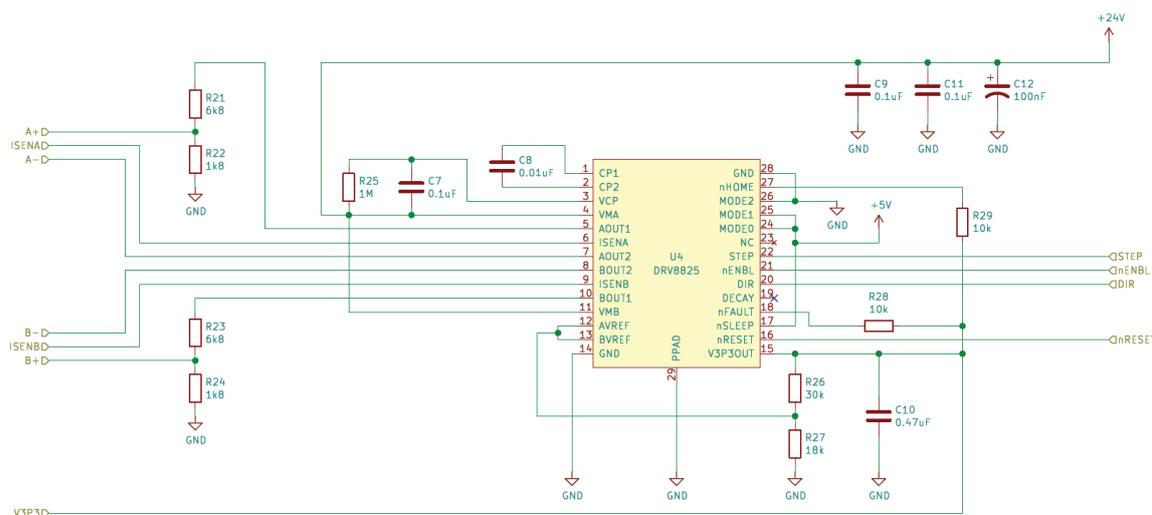


Ilustración 50. Circuito DRV8825

De entre las modificaciones realizadas sobre el ejemplo de aplicación típica, las más destacables son fundamentalmente las siguientes:

- Al tener que emplear las salidas del circuito como entradas lógicas del DRV8874, en vez de conectarlas directamente al motor, se han situado divisores de tensión para conseguir que el voltaje en la salida que normalmente sería de 24V, pase a ser de 5V.
- En vez de controlar el número de micropasos desde el microcontrolador actuando sobre los pines MODE, se han cableado directamente a los valores lógicos adecuados para obtener una configuración fija de 8 micropasos por paso del motor:

Tabla 11. Configuración del DRV8825

MODE2	MODE1	MODE0	STEP MODE
0	0	0	Full step (2-phase excitation) with 71% current
0	0	1	1/2 step (1-2 phase excitation)
0	1	0	1/4 step (W1-2 phase excitation)
0	1	1	8 microsteps/step
1	0	0	16 microsteps/step
1	0	1	32 microsteps/step
1	1	0	32 microsteps/step
1	1	1	32 microsteps/step

4.3.2.2.3. Circuito del DRV8874

Al igual que sucede con el DRV8825, el datasheet del driver DRV8874 (extracto disponible en Anexo 4) presenta ejemplos de aplicación típica. En este caso, las principales modificaciones que se deben realizar sobre ese circuito es adaptarlo para que sea controlado desde otro driver en vez de un microcontrolador como está planteado.

Para realizar esta adaptación, se ha polarizado correctamente la salida IPROPI para poder conectarse al driver. Además, se ha cableado la salida nSLEEP a la salida de 3.3V del DRV8825 para que así, si se inhabilitara el DRV8825, se obtenga un 0 lógico en esta entrada y el driver entre reposo. Esto, sumado a otras pequeñas modificaciones da lugar al siguiente circuito electrónico (ver planos en Anexo 5):

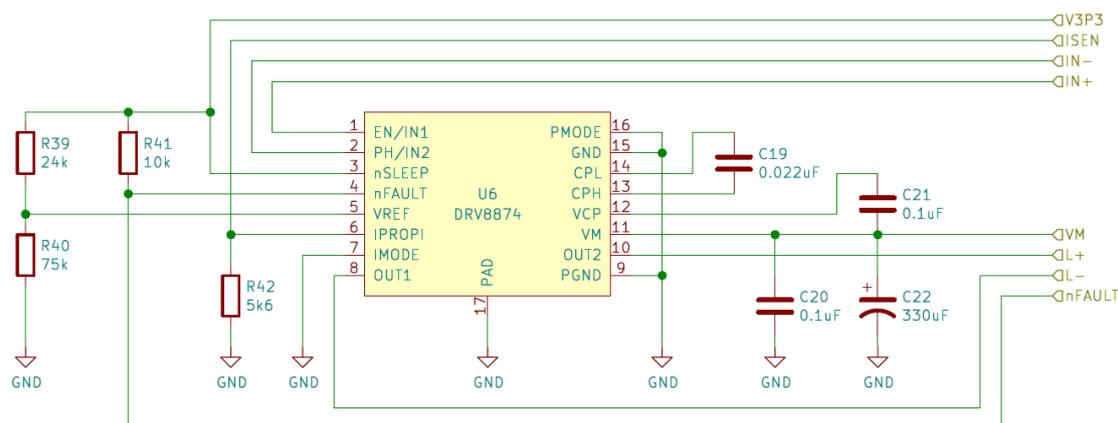


Ilustración 51. Circuito DRV8874

4.3.2.2.4. Esquema electrónico completo

Una vez se disponen de los circuitos del ESP32 y de los drivers es posible elaborar un esquema electrónico completo de la PCB de control uniendo adecuadamente los elementos entre y replicando las partes que sean necesarias.

Sin embargo, no basta con relacionar estos circuitos entre sí, también deben relacionarse con los componentes externos a la placa. Por este motivo, finalmente, se incorporan al circuito los conectores externos que permiten la conexión de elementos externos a la placa y se termina de relacionar todos los elementos entre sí para dar lugar a un único esquema electrónico. Si bien es cierto que es necesario añadir algo más de circuitería para que no haya problemas de compatibilidad entre los elementos externos y los componentes electrónicos.

De hecho, tras incorporar los conectores faltan, fundamentalmente, dos partes en la circuitería:

- Un regulador lineal de tensión que suministre los 3.3V que requiere el ESP32 para su funcionamiento: Puesto que a través del puerto USB se introducen 5V a la placa, el regulador lineal se establece para pasar de 5 a 3.3V.
- Una etapa de adaptación de las señales obtenidas de los encoders incrementales: Al alimentar los encoders a 5V, la señales que proporcionan son ondas cuadradas con niveles lógicos de 0 y 5V. Estas señales son leídas por el ESP32, que admite un máximo de 3.3V. Por este motivo, esta etapa electrónica de adaptación es tan simple como varios divisores de tensión que permiten obtener una señal de onda cuadrada idéntica a las originales salvo por que los niveles lógicos pasan a ser 0 y 3.3V.

Una vez unidos todos los componentes entre sí y añadidos los elementos faltantes, se obtiene un circuito electrónico representado por el siguiente esquema (ver planos en Anexo 5):

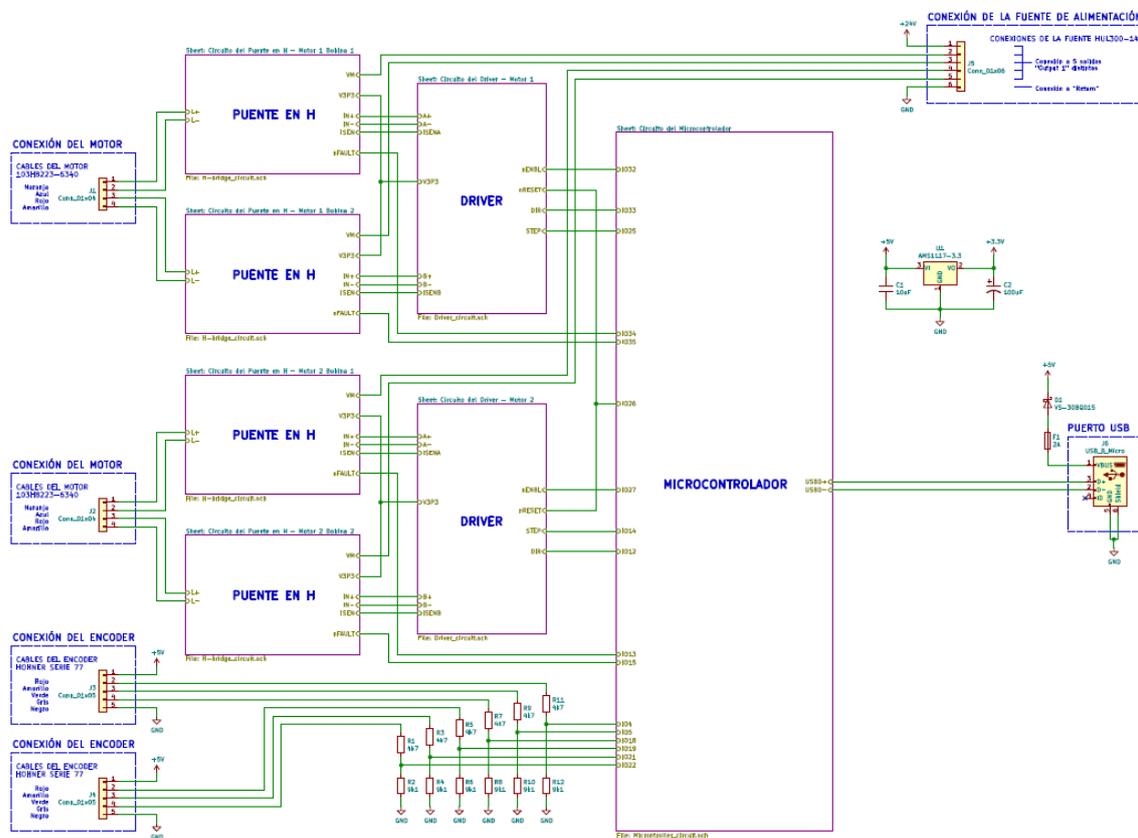


Ilustración 52. Esquema electrónico completo

Diseño

4.3.2.2.5. Placa de circuito impreso

Partiendo de los esquemas electrónicos anteriores, se procede a diseñar la placa de circuito impreso. Es decir, se pasa de una representación esquemática de la electrónica del sistema a una representación que permita fabricar físicamente el circuito deseado y concretarlo como un único elemento que aglutina todos los componentes anteriormente explicados.

Siguiendo los esquemas y determinando cuál es el encapsulado correcto de cada uno de los componentes mediante los datasheets, se ha realizado un proceso de diseño cuya solución queda plasmada en la siguiente PCB (consultar Planos en el Anexo 5):

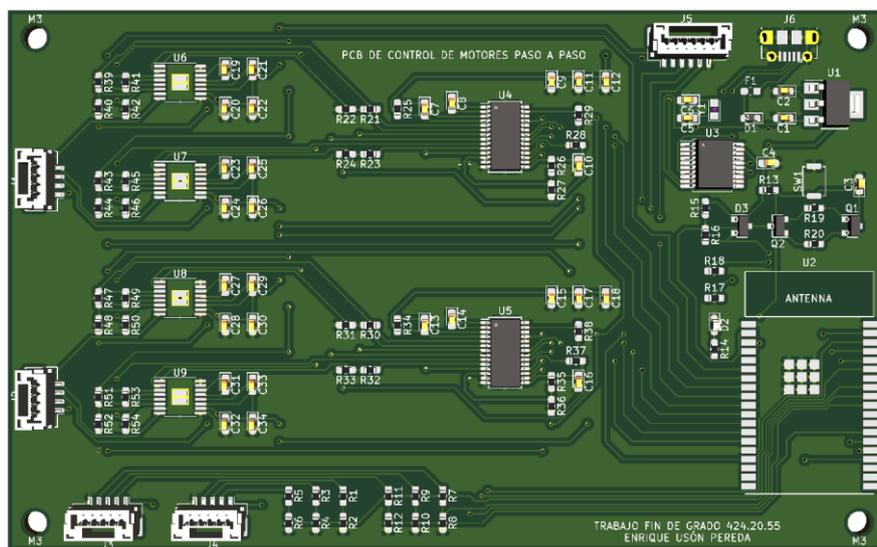


Ilustración 53. Placa de circuito impreso

Se ha de tener en cuenta que la imagen anterior es sólo una representación de cómo se vería la placa después de su fabricación. Para comprender la disposición de los componentes, sus dimensiones y cómo se encuentran relacionados entre sí, es recomendable consultar los planos en el Anexo 5:

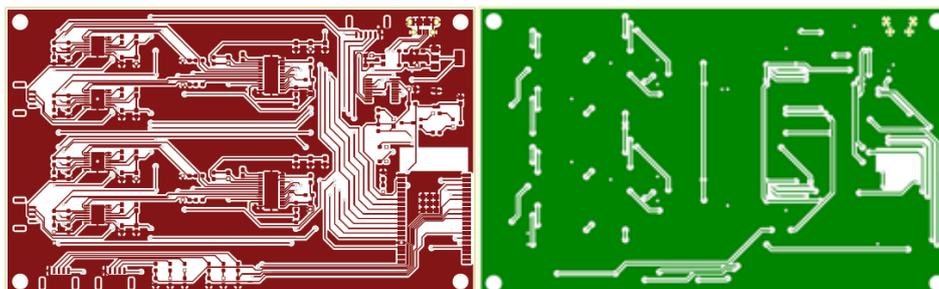


Ilustración 54. Detalle de las pistas de la parte frontal de la placa

Ilustración 55. Detalle de las pistas de la parte trasera de la placa

5. CONCLUSIONES

Tras haber concluido el proceso de diseño, se puede concluir que se ha cumplido el objetivo fundamental del trabajo. Se ha planteado una propuesta de mejora para el sistema de control de posición de la máquina de corte y grabado láser del laboratorio del Departamento de Física Aplicada de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza y se ha desarrollado exitosamente de forma teórica hasta alcanzar una solución ajustada a las características de esta.

Esto se ha logrado debido a que se han cumplido los objetivos secundarios necesarios para llegar a una solución: Se han identificado todos los componentes posibles de la máquina, se ha recabado información sobre los mismos para conocer sus características, se ha podido describir y caracterizar el funcionamiento de la máquina, se ha conseguido determinar que se pueden conservar los motores paso a paso para lograr la precisión de una micra empleando drivers de micropaso, se han estudiado de forma teórica las posibles implicaciones de implementar un encoder incremental y se ha diseñado exitosamente una estructura mecánica y una PCB para poder materializar las modificaciones necesarias para mejorar el sistema.

A pesar de haber resuelto las cuestiones planteadas de forma exitosa, la solución del planteada se encuentra incompleta. Esto se debe a que la idea original propuesta por el personal del Departamento de Física Aplicada era llegar a aplicar las mejoras sobre la máquina y poner a prueba el nuevo funcionamiento. Sin embargo, debido a la envergadura que supondría desarrollar un trabajo de estas características y a que no se ha podido acceder a la máquina, esta idea ha acabado descartándose optándose en su lugar por plantear la solución de forma teórica.

Por este motivo, la posibilidad de desarrollar un trabajo futuro que sirva de continuación a este venía implícita en el planteamiento inicial. De esta forma, este trabajo consiste, esencialmente, en llevar a cabo el diseño de la propuesta de mejora y la continuación consistiría en aplicarla sobre la máquina.

El trabajo futuro en cuestión debería centrarse en comprar los elementos comerciales planteados a lo largo de este trabajo y en fabricar tanto el conjunto soporte del motor como la PCB de control de los motores paso a paso. Una vez se tuvieran todos los componentes, se tendrían que montar en la máquina y ponerlos a prueba para comprobar que el funcionamiento es el correcto. De no ser así, sería necesario analizar si se hay algún error en el planteamiento teórico y aplicar las correcciones necesarias.

Conclusiones

Este es un trabajo teórico con la finalidad de que las ideas aquí planteadas se desarrollen en un trabajo posterior para lograr la puesta en marcha de la máquina. La función que cumple este trabajo es la recopilación de información y plantear una solución. La continuación debe ejecutar la solución a partir de la información recopilada.

Una vez se tuviese un sistema mecánico y un sistema electrónico funcional, se desarrollaría el programa informático que mejora la facilidad de uso del actual e incluso, introdujera nuevas funcionalidades como introducir trayectorias mediante ficheros de formato vectorial. Esto, podría hacer necesario llevar a cabo un desarrollo matemático para determinar las ecuaciones del movimiento que caracterizan a la máquina y que permiten realizar el cálculo de trayectorias.

De hecho, estos son esencialmente los motivos por los cuales no se ha desarrollado un programa informático, a pesar de ser una parte esencial de un sistema de control. Aunque sobre el papel la solución planteada es adecuada y está bien fundamentada, se desconocen las posibles implicaciones que puedan derivarse por su aplicación. Hay muchos detalles de la máquina que se desconocen y, hasta que no se pueda observar su funcionamiento experimentalmente, no se podrán determinar los problemas que puedan surgir y las posibles correcciones sobre el planteamiento teórico.

El código del programa está condicionado al funcionamiento de la máquina y a las características de los componentes que intervienen. Desconociendo gran parte de los factores que puedan afectar al comportamiento de la máquina, no tiene mucho sentido desarrollar un programa informático que no tenga garantías de funcionamiento y que, con toda probabilidad, haya que rehacer radicalmente.

Estas son las razones que han llevado a la consideración de que la escritura del código del programa es una parte del proceso que corresponde a la posible continuación de este trabajo. Para escribir correctamente el código, se necesita comprobar su funcionamiento empíricamente sobre la máquina real, así, se pueden determinar los detalles necesarios a tomar en consideración para poder concretar un programa que controle el funcionamiento de la máquina.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

All About Stepper Motors. (s. f.). Adafruit Learning System. Recuperado 21 de septiembre de 2020, de <https://learn.adafruit.com/all-about-stepper-motors/what-is-a-stepper-motor>

Bits | CLPU. (s. f.). Recuperado 1 de septiembre de 2020, de <https://www.clpu.es/bits>

Codificador rotatorio. (2020). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Codificador_rotatorio&oldid=128885922

Corte láser | Cortador láser y equipos es-us. (s. f.). Recuperado 1 de septiembre de 2020, de <https://www.ulsinc.com/es/conocer/corte-l%C3%A1ser>

Dejan. (2015, agosto 8). How a Stepper Motor Works. *HowToMechatronics*. <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/stepper-motor/>

Grabado láser | Máquinas de Grabado láser químico—Grabado láser es-us. (s. f.). Recuperado 1 de septiembre de 2020, de <https://www.ulsinc.com/es/conocer/grabado-l%C3%A1ser>

Láser. (2020). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=L%C3%A1ser&oldid=128889215>

Laser2020.pdf. (s. f.). Recuperado 1 de septiembre de 2020, de <https://www.clpu.es/sites/default/files/Laser2020.pdf>

Lista de procesos láser | Interacción—Modificación es-us. (s. f.). Recuperado 1 de septiembre de 2020, de <https://www.ulsinc.com/es/conocer/lista-de-procesos-l%C3%A1ser>

Máquinas y sistemas de marcado láser | Marcador láser es-us. (s. f.). Recuperado 1 de septiembre de 2020, de <https://www.ulsinc.com/es/conocer/marcado-l%C3%A1ser>

Mecafenix, I. (2017, abril 20). Motor paso a paso ¿que es y como funciona? *Ingeniería Mecafenix*. <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>

Motor paso a paso. (s. f.). Mecatrónica LATAM. Recuperado 21 de septiembre de 2020, de <https://www.mecatronicalatam.com/es/tutoriales/motor/motores-electricos/motor-de-corriente-continua/motor-paso-a-paso/>

Referencias bibliográficas

Motor paso a paso. (2020). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*.
https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Motor_paso_a_paso&oldid=127019220

Motores paso a paso. (s. f.). Recuperado 21 de septiembre de 2020, de
http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/cyr_01/robotica/sistema/motores_p-p.htm

Procesamiento de materiales mediante láser | Interacción—Modificación es-us. (s. f.). Recuperado 1 de septiembre de 2020, de
<https://www.ulsinc.com/es/conocer/procesamiento-de-materiales-mediante-l%C3%A1ser>

¿Qué es un láser? | ¿Cómo se usa la tecnología láser? Es-us. (s. f.). Recuperado 1 de septiembre de 2020, de <https://www.ulsinc.com/es/conocer>

Servo planetary gearbox | Bosch Rexroth USA. (s. f.). Recuperado 29 de agosto de 2020, de <https://www.boschrexroth.com/product-link?cat=Electric-Drives-and-Controls-Catalog&p=p675548&c=US&lang=en>

Stepper motor. (2020). En *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Stepper_motor&oldid=979067267

Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS. (s. f.). Recuperado 21 de septiembre de 2020, de
<https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>

What Is a Laser? | NASA Space Place – NASA Science for Kids. (s. f.). Recuperado 1 de septiembre de 2020, de <https://spaceplace.nasa.gov/laser/en/>



Relación de documentos

(X) Memoria	70	páginas
(_) Anexos	151	páginas

La Almunia, a 23 de septiembre de 2020

Firmado: Enrique Usón Pereda