

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO DE RECUBRIMIENTO POR SPRAY TÉRMICO



LEYDI JULIETA CARDENAS FLECHAS  
JUAN DAVID FUENTES MOJICA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA  
2014

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO DE RECUBRIMIENTO POR SPRAY TÉRMICO

LEYDI JULIETA CARDENAS FLECHAS  
JUAN DAVID FUENTES MOJICA

Trabajo de grado en la modalidad de proyecto de investigación para optar al título de  
Ingeniero Electromecánico

Director:  
MSc. EDGAR ABSALÓN TORRES BARAHONA  
Magister en Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA  
2014

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del Director de Proyecto

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Duitama, 31 de Octubre de 2014

## **DEDICATORIA**

*A Dios, por bendecirme con personas y cosas buenas. Por darme fuerza en momentos  
difíciles.*

*A José y Julieta, mis padres; a mi hermana Elizabeth. Por todo su apoyo y fé en mí.*

***Leydi Julieta Cardenas Flechas***

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo se lo dedico con mucho amor a mi madre, a mi padre y a mi hermano que siempre me apoyan en los momentos más difíciles de mi vida y me dan fuerzas para nunca desfallecer.*  
*Gracias Dios por estar en mi corazón.*

***Juan David Fuentes Mojica***

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su común gratitud a:

A Dios, a nuestras familias que nos han apoyado en cada momento y nos brindaron su comprensión, a nuestros amigos que nos motivaron a seguir adelante.

Al Ingeniero Edgar Torres Barahona, que con su apoyo incondicional, nos ayudó a crecer intelectualmente y como personas; sin él hubiera sido muy difícil llegar a la meta.

A la Ingeniera María Luisa Pinto, al Ingeniero Orlando Díaz, al Ingeniero Heriberto Pinto, al Ingeniero Melchor Granados, al Ingeniero Oliverio Duran que compartieron sus conocimientos y valiosos aportes en el desarrollo del proyecto.

A todas esas buenas personas que hacen parte de la familia de la UPTC que con su trabajo contribuyeron al avance del proyecto, especialmente al grupo GENTE.

Al Instituto para la investigación e innovación en ciencia y tecnología de materiales - INCITEMA, por permitirnos trabajar con ellos.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	15
1. LOS TRATAMIENTOS SUPERFICIALES ENFOCADOS A LA PROYECCIÓN TÉRMICA CON SISTEMAS DE CONTROL Y POSICIONAMIENTO MECÁNICO.....	16
1.1 TRATAMIENTO SUPERFICIAL.....	16
1.2 TIPOS DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL .....	16
1.2.1 Recubrimiento por proyección térmica.....	16
1.2.2 Combustión por llama.....	20
1.3 PÁRAMETROS DEL RECUBRIMIENTO POR PROYECCIÓN TÉRMICA.....	22
1.3.1 Polvo de proyección.....	22
1.3.2 Gases de aporte .....	22
1.3.3 Distancia de proyección.....	23
1.3.4 Velocidad de desplazamiento de la antorcha.....	24
1.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS .....	24
1.5 TIPOS DE RECUBRIMIENTO POR PROYECCIÓN TÉRMICA .....	25
1.6 EQUIPOS DE RECUBRIMIENTO EXISTENTES.....	31
1.6.1 Proceso manual.....	31
1.6.2 Procesos Automáticos.....	31
1.7 SISTEMA MECÁNICO .....	35
1.8 SISTEMA DE DOSIFICACIÓN .....	35
1.8.1 Pharma Coperion K-Tron.....	36
1.8.2 Gravimetric Dispenser.....	37
1.8.3 Flame Spray Technologies.....	38
1.8.4 Automated Enzyme Screening System .....	39
1.9 INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA .....	39
1.10 MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DEL MOVIMIENTO .....	41
1.10.1 Tornillo de bolas.....	41
1.10.2 Guías lineales .....	42
1.10.3 TORNILLO DE POTENCIA .....	42
2. DISEÑO MECÁNICO DEL EQUIPO DE RECUBRIMIENTO POR SPRAY TÉRMICO .....	44
2.1 GENERALIDADES .....	44

2.2	CRITERIOS DE DISEÑO .....	45
2.3	MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DEL MOVIMIENTO .....	47
2.3.1	Movimiento en el eje Y .....	47
2.3.2	Movimiento en el eje X .....	52
2.3.3	Movimiento en el eje Z .....	57
2.4	DISEÑO DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN .....	58
2.4.1	Sistema de depósito.....	58
2.4.2	Diseño de plato dosificador .....	59
2.4.3	Tapa superior .....	60
2.4.4	Tapa inferior.....	61
2.4.5	Ensamble.....	62
2.5	CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS DE MOVIMIENTO EN LOS TRES EJES .....	63
2.5.1	Sistema horizontal .....	63
2.5.2	Sistema vertical.....	65
2.5.3	Sistema de giro.....	68
2.5.4	Sistema de dosificación.....	69
2.6	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA .....	70
3.	DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL .....	72
3.1	SELECCIÓN DEL SOFTWARE CONTROLADOR .....	73
3.2	SELECCIÓN DEL CONTROLADOR PRINCIPAL.....	74
3.2.1	Arduino Mega 2560 .....	76
3.2.2	Comunicación.....	76
3.3	SELECCIÓN DE LOS ACTUADORES .....	77
3.4	SELECCIÓN DE LOS SENSORES.....	80
3.5	DISTRIBUCIÓN DE PINES DE CONEXIÓN.....	82
3.6	DISEÑO DE LOS CIRCUITOS IMPLEMENTADOS DE POTENCIA Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL DE ACTUADORES Y SENSORES .....	84
3.6.1	CIRCUITO DE POTENCIA DE ENCENDIDO .....	84
3.6.2	CIRCUITO DE PARADA DE EMERGENCIA Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL A SENSORES FIN DE CARRERA .....	85
3.6.3	CIRCUITOS DE POTENCIA DE MOTOR PASO A PASO Y MOTORES DE DOSIFICADOR .....	86



3.6.4	CIRCUITO DE POTENCIA PARA EL CONTROL DEL MOVIMIENTO VERTICAL .....	87
3.6.5	CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL A SENSOR INFRARROJO Y CONTROL DE VELOCIDAD DEL VARIADOR DE FRECUENCIA. ....	88
3.6.6	CIRCUITO ACONDICIONADOR DE SEÑAL PARA ENCODER DE POSICIONAMIENTO ..	89
4.	DESARROLLO DE LAS HERRAMIENTAS SOFTWARE PARA EL GOBIERNO DEL EQUIPO DE RECUBRIMIENTO POR SPRAY TÉRMICO.....	92
4.1	INTRODUCCIÓN DE DATOS .....	95
4.2	POSICIÓN DE REFERENCIA .....	96
4.3	POSICIÓN DE TRABAJO VERTICAL .....	97
4.4	POSICIÓN DE TRABAJO HORIZONTAL Y VARIADOR DE VELOCIDAD .....	98
4.5	CALENTAMIENTO .....	99
4.6	TRABAJO.....	102
4.7	LIBERAR SENSORES .....	104
4.8	INTERFAZ GRÁFICA.....	106
5.	IMPLEMENTACIÓN.....	113
5.1	SISTEMA MECÁNICO IMPLEMENTADO .....	113
5.1.1	Carcasa .....	114
5.1.2	Sistema horizontal implementado.....	114
5.1.3	Sistema vertical implementado .....	115
5.1.4	Disposiciones generales .....	116
5.1.5	Pruebas al sistema de posicionamiento .....	117
5.2	ENSAMBLE DEL SISTEMA ELECTRÓNICO.....	117
5.3	ENSAMBLE DEL SISTEMA DE GIRO .....	119
5.4	ENSAMBLE DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN.....	120
6.	CONCLUSIONES.....	124
	RECOMENDACIONES.....	125
	BIBLIOGRAFIA.....	126
	ANEXO A.....	129
	ANEXO B.....	130
	ANEXO C.....	137
	ANEXO D.....	138

## LISTA DE FIGURAS

Figura. 1-1 Esquema del recubrimiento creado por proyección .....	18
Figura. 1-2 Recubrimiento por spray térmico.....	19
Figura. 1-3 Proyección térmica por llama .....	32
Figura. 1-4 Esquema de la antorcha .....	32
Figura. 1-5 Distancia de proyección entre la boquilla y el sustrato .....	232
Figura. 1-6 Procesos por Spray .....	25
Figura. 1-7 Recubrimiento por proyección térmica manual.....	27
Figura. 1-8 Equipo de arco eléctrico y de combustión Metco 8400.....	32
Figura. 1-9 Planta piloto para la obtención de recubrimientos.....	32
Figura. 1-10 Equipo Fanuc M7-10i.....	33
Figura. 1-11 Sistema de Spray con Plasma para recubrimientos de discos de ventilador .....	34
Figura. 1-12 Sistema multiprocesos.....	34
Figura. 1-13 Sistema Pharma Coperion K-Tron- a la izquierda modo gravimétrico, a la derecha modo volumétrico.....	37
Figura. 1-14 Gravimetric dispenser system .....	38
Figura. 1-15 FTS 10/MC Powder Feeder .....	38
Figura. 1-16 Automated Enzyme Screening System .....	39
Figura. 1-17 Diagrama de flujo de información para control del sistema .....	40
Figura. 1-18 Tornillo de bolas .....	41
Figura. 1-19 Guías lineales .....	42
Figura. 1-20 Tornillo de potencia.....	43
Figura. 2-1 Movimientos realizados en el recubrimiento.....	44
Figura. 2-2 Componentes del sistema vertical.....	48
Figura. 2-3 Posición de referencia para el sistema vertical. ....	48
Figura. 2-4 Curva de calibración vertical.....	49
Figura. 2-5 Aceleración inicial .....	51
Figura. 2-6 Análisis de fuerzas en el tornillo .....	52
Figura. 2-7 Componentes del sistema horizontal .....	54
Figura. 2-8 Vista de conjunto del sistema horizontal: a la izquierda en posición de trabajo y a la derecha el detalle interno.....	56
Figura. 2-9 Ensamble del sistema horizontal y vertical.....	56
Figura. 2-10 Componentes del sistema de giro .....	57
Figura. 2-11 Vista de corte de dosificador .....	59
Figura. 2-12 Plato dosificador diseñado, arriba vista superior .....	60
Figura. 2-13 vista frontal con líneas ocultas. ....	60
Figura. 2-14 Arriba vista superior de la tapa superior, abajo vista posterior .....	61
Figura. 2-15 Abajo vista posterior de la tapa inferior, arriba vista superior.....	62

Figura. 2-16 Dosificador diseñado .....	62
Figura. 2-17 Soporte dosificador.....	63
Figura. 2-18 Rampa de movimiento de los motores.....	63
Figura. 2-19 Soporte dosificador.....	69
Figura. 2-20 Carcasa equipo de recubrimiento.....	70
Figura. 2-21 Equipo de recubrimiento en diseño CAD.....	71
Figura. 3-1 Sistema de control para la planta .....	72
Figura. 3-2 Sistema de control .....	78
Figura. 3-3 Ventanas de visualización de labview 2010 a la derecha panel frontal a la izquierda diagrama de bloques.....	74
Figura. 3-4 Tarjeta Arduino Mega 2560 seleccionada .....	76
Figura. 3-5 Motor de corriente continua utilizado en la implementación .....	78
Figura. 3-6 Motor paso a paso .....	78
Figura. 3-7 Variador de velocidad y motor de corriente alterna .....	79
Figura. 3-8 Motores utilizados para movimiento del dosificador.....	79
Figura. 3-9 Electroválvula.....	80
Figura. 3-10 Sensor fin de curso.....	80
Figura. 3-11 Encoder para control de posicionamiento .....	81
Figura. 3-12 Sensor infrarrojo .....	81
Figura. 3-13 Distribución de pines de la tarjeta Arduino Mega 2506.....	83
Figura. 3-14 Diseño de la tarjeta controladora para el circuito de encendido .....	85
Figura. 3-15 Diseño de la tarjeta controladora para la parada de emergencia y sensores .....	86
Figura. 3-16 Diseño de la tarjeta para el control del motor paso a paso.....	87
Figura. 3-17 Diseño de la tarjeta controladora encargada del movimiento vertical .....	88
Figura. 3-18 Tarjeta controladora para el sensor infrarrojo y control de velocidad de giro .....	89
Figura. 3-19 Circuito para Encoder de posicionamiento.....	90
Figura. 3-20 Diagrama de Conexión de los componentes del encoder. ....	91
Figura. 3-21 Disposición general de los circuitos de los componentes electrónicos del equipo de recubrimiento .....	927
Figura. 4-1 Gráfica de control del sistema .....	92
Figura. 4-2 Programación para introducción de datos .....	95
Figura. 4-3 Programación para posición de referencia.....	96
Figura. 4-4 Diagrama de flujo para posición de referencia.....	96
Figura. 4-5 Programación para el trabajo vertical .....	98
Figura. 4-6 Programación para el trabajo horizontal y encendido de variador de velocidad .....	99
Figura. 4-7 Programación para el calentamiento .....	100
Figura. 4-8 Diagramas de flujo del proceso de calentamiento .....	101
Figura. 4-9 Programación para trabajo .....	102
Figura. 4-10 Diagrama de flujo para trabajo.....	103
Figura. 4-11 Programación para liberar sensores.....	104

Figura. 4-12 Diagrama de flujo para trabajo con calentamiento.....	105
Figura. 4-13 Diagrama de flujo para trabajo sin calentamiento .....	106
Figura. 4-14 Elementos del sistema de dosificación .....	107
Figura. 4-15 Interfaz para el equipo de recubrimiento.....	108
Figura. 5-1 Sistemas horizontal y vertical implementado.....	114
Figura. 5-2 Fabricación de la carcasa .....	114
Figura. 5-3 Sistema horizontal implementado.....	115
Figura. 5-4 Verificación de planos del equipo de recubrimiento.....	115
Figura. 5-5 Terminado de la estructura exterior.....	116
Figura. 5-6 A la izquierda equipo simulado, a la derecha implementado. ....	117
Figura. 5-7 Fabricación de las tarjetas de control.....	118
Figura. 5-8 Ubicación de componentes en el compartimento de control.....	119
Figura. 5-9 Ensamble general del sistema electrónico .....	119
Figura. 5-10 Ensamble del sistema de giro .....	120
Figura. 5-11 Tapa superior implementada.....	121
Figura. 5-12 Tapa inferior implementada .....	121
Figura. 5-13 Tolva implementada .....	122

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1. Diversas tipos de proyección térmica .....	24
Tabla 1-2 Diversas tipos de proyección térmica .....	26
Tabla 2-1 Velocidades determinadas en el sistema de giro .....	69
Tabla 3-1 Variables del sistema.....	75
Tabla 4-1 Diagramas de bloque implementados .....	94
Tabla 4-2 Sub Vis implementados.....	109
Tabla 5-1 Datos de desplazamiento de la antorcha en el eje horizontal.....	117

## RESUMEN

La industria de los recubrimientos de piezas mecánicas tiene gran acogida a nivel mundial, su fin es generar técnicas que brinden protección a estructuras con problemas como la corrosión, el desgaste y la pérdida de energía. La ingeniería moderna ha creado diferentes técnicas de recubrimientos según sea la necesidad, una de ellas es la proyección térmica, un método que ha mostrado excelentes resultados para proteger diversas estructuras y reducir costos de mantenimiento. En los recubrimientos de proyección térmica las partículas se funden total o parcialmente en una llama oxiacetilénica y luego son aceleradas para que impacten un sustrato y se adhieran mecánicamente, allí se aplanan y forman laminillas, llamadas splats, dando origen al recubrimiento.

Se ha desarrollado un sistema automatizado que suple las necesidades de aplicación de recubrimientos para atender a parámetros de calidad. El equipo diseñado e implementado contempla el diseño mecánico de la planta, la unidad de control, el equipo de dosificación, el dispositivo de proyección térmica y la interfaz hombre máquina para el control de posición, velocidad y aceleración requeridas en la aplicación óptima del recubrimiento, la cual se realiza a partir de la combinación de movimientos horizontal y vertical para el desplazamiento de la antorcha de proyección y un sistema de giro donde se fija el elemento a recubrir; la sensórica involucrada proporciona la información para el análisis de temperatura de deposición, el espacio de trabajo y las posiciones de referencia. La calidad del recubrimiento se establece a través de pruebas de laboratorio con equipos de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y dureza.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente en el mundo se está trabajando en temáticas como la optimización de los sistemas a través del control avanzado para mejorar la precisión y terminado superficial, caracterización y aplicación de nuevos materiales para las diferentes técnicas de recubrimientos, enfocándose en la mejora de las propiedades de los materiales a través de diversos métodos de protección, lo que permite una innovación y desarrollo respecto a éste tipo de tecnología en diversos campos.

Por esto los recubrimientos se convierten en una forma de generar y garantizar características y propiedades a piezas o elementos, ya que son excelentes para proteger estructuras expuestas a ambientes degradantes, lo que brinda múltiples aplicaciones. Actualmente se desarrollan investigaciones en la línea de tratamientos superficiales que tengan como fin generar nuevos revestimientos con parámetros específicos y que suplan las necesidades de protección de superficies de acuerdo a la aplicación.

Para lograr la calidad esperada en procesos de investigación requeridos en recubrimientos por el Instituto para la investigación e innovación en ciencia y tecnología de los materiales-INCITEMA; se proyecta el diseño e implementación de un equipo de recubrimiento de posicionamiento tridimensional, con las características y restricciones especificadas para su funcionamiento con el fin de obtener resultados que puedan ser verídicos y sustentables. Teniendo en cuenta que en el mercado no se encuentran equipos de laboratorio con las características requeridas por el trabajo experimental en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

El proyecto se enmarca dentro de la línea de investigación de diseño mecánico y procesos de producción, desarrollado por el grupo de energías y nuevas tecnologías-GENTE; plantea las fases de diseño y construcción del equipo de recubrimiento por spray térmico y en su desarrollo se integran teorías, estrategias y herramientas del diseño mecánico, automatización, control y software que permiten el desarrollo de una base del conocimiento aplicable al surgimiento de nuevos proyectos.

El texto está dividido en cinco capítulos que describen el diseño e implementación de un equipo de recubrimiento. En el capítulo uno se describe el marco teórico sobre el estado actual del tema, en los capítulos dos y tres se muestra el diseño mecánico del sistema horizontal, vertical y giro establecidos para la elaboración del equipo junto con el sistema de dosificación, en los capítulos cuatro y cinco se explica la selección del sistema electrónico de control y las herramientas software utilizadas, finalmente se presentan los apartados de conclusiones y recomendaciones.

# **1. LOS TRATAMIENTOS SUPERFICIALES ENFOCADOS A LA PROYECCIÓN TÉRMICA CON SISTEMAS DE CONTROL Y POSICIONAMIENTO MECÁNICO**

## **1.1 TRATAMIENTO SUPERFICIAL**

Un tratamiento superficial se realiza para proporcionar unas características determinadas a una pieza o superficie. Pueden emplearse para aumentar o controlar la dureza, obteniendo superficies más resistentes al desgaste, permiten obtener un coeficiente de fricción adecuado en el contacto entre dos superficies, disminuyen la adhesión, aumentar la resistencia a la corrosión, oxidación y resistencia mecánica. Algunos tratamientos se realizan de forma superficial, cambiando las propiedades hasta cierta profundidad sin afectar al material del interior de la pieza.

## **1.2 TIPOS DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL**

Dentro de las alternativas de tratamiento superficial se tienen:

- Tratamientos mecánicos: cómo granallado, impacto con chorro de arena, impacto láser, bruñido, endurecimiento por explosivo etc.
- Tratamientos térmicos superficiales: entre ellos se encuentra el recocido, temple, revenido, maduración, bonificado.
- Revestimiento o deposición de material: se emplean para recubrir superficies y obtener características determinadas que las hagan más resistentes. Se cuentan con algunos procesos como:
  - Recubrimiento por galvanización en caliente.
  - Procesos de pasivación.
  - Chorro de arena.
  - Recubrimiento por proyección térmica

### **1.2.1 Recubrimiento por proyección térmica**

La proyección térmica, como tecnología de recubrimiento de superficies reúne numerosas características efectivas, brinda la posibilidad de combinación de materiales base y materiales de recubrimiento dándole características especiales a la pieza o elemento con



el fin de que adquiriera propiedades que lo hagan resistente a diversos factores que generan desgaste.

Este tratamiento tiene como objeto fundir en gotas de material de aporte como polvo, hilo, etc. mediante una fuente calorífica con potencia suficiente para lanzar las gotas que impactan contra el sustrato, con la potencia suficiente para evitar el deterioro de sus características.

Los elementos que hacen parte del conjunto de proyección térmica incluyen la antorcha, el combustible, el carburante, oxígeno y el flujo de material que debe adherirse a la superficie tratada.

Existen diversas ventajas y aplicaciones del proceso de recubrimiento por proyección térmica, se puede recubrir cualquier tipo de material, tiene gran flexibilidad, se reproduce con facilidad, posee gran precisión de calibre, la capa de recubrimiento puede contener varios elementos con se puede combinar con ellos por ejemplo el nitrógeno, cromo, carburos; poseen un alto nivel de calidad entre otros.

Dentro de las aplicaciones se encuentra la protección contra la corrosión, desgaste por fricción, barreras térmicas, resistencia eléctrica, ataque químico, atmosfera oxidante.

Describiendo de manera más específica el proceso de recubrimiento por proyección térmica se indica que la pieza se encuentra ubicada dentro de una cámara donde está próxima a la antorcha que realiza el recubrimiento, se utiliza un material de revestimiento de características detalladas, por efecto de la combustión del gas oxigenado, el material se calienta a altas temperaturas convirtiéndose en micropartículas, estas son rociadas sobre el sustrato por medio de una fuerte corriente de aire comprimido, inyectado a través de una manguera sellada hacia la cámara, ocasionando que millones de partículas sean expulsadas a velocidades extremas sobre la pieza, creando una estructura homogénea sobre la superficie denominada sustrato, lo que genera una excelente tolerancia a la corrosión y el deterioro.

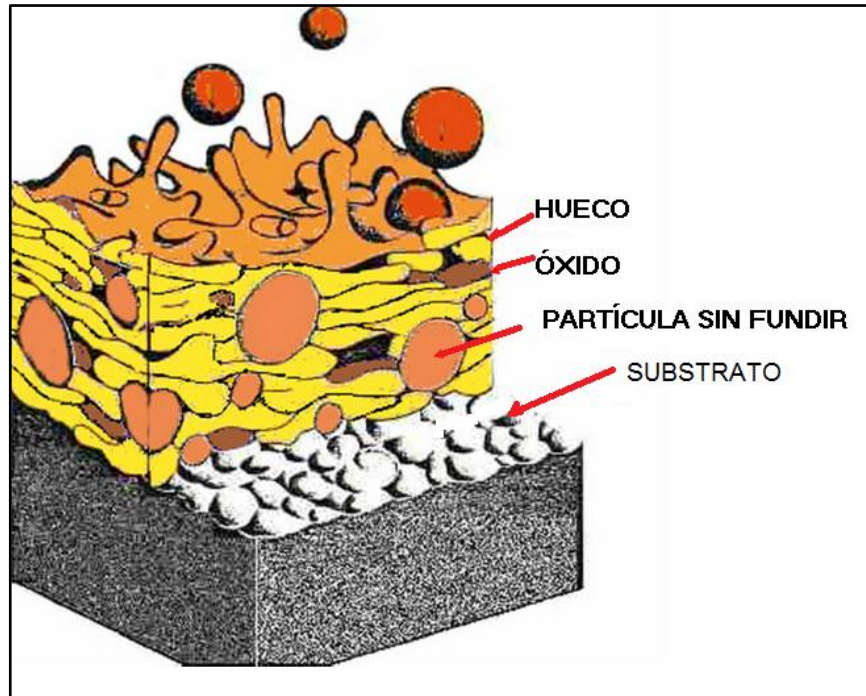
En la figura 1-1, se muestra la adhesión de las partículas también llamadas splats, al material al que se le aplica el recubrimiento.

Los procesos de recubrimiento son agrupados en tres grandes categorías: proyección por arco de plasma, proyección por arco eléctrico, y proyección por llama. Estas fuentes de energía son utilizadas para calentar el material de recubrimiento en forma de polvo, alambre o varilla, hacia un estado fundido o semifundido.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> CASTELLANOS, Laura. Resistencia a la corrosión en recubrimientos comerciales Metaceram 25050 y Proxon 21071 producidos con el sistema de proyección térmica por llama. Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Mecánica: Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, 2011. 52p.

Figura. 1-1 Esquema del recubrimiento creado por proyección



Fuente: <http://tecnoatocha.files.wordpress.com/2010/07/figura-1-3-copia.jpg>

La proyección en frío es una reciente adición a la familia de procesos de proyección térmica. Este proceso típicamente utiliza un modesto precalentamiento, pero es mayormente un proceso de energía cinética que está directamente relacionada con la velocidad de las partículas involucradas en el proceso.

La proyección por spray térmico ha logrado un avance importante, el sistema de combustión oxiacetilénica fue la primera que se usó para metalizar estructuras metálicas, los métodos han ido avanzando hasta llegar técnicas sofisticadas como plasma, arco por spray, proyección térmica usando hilo, que más adelante se trataran a profundidad.

Todos los procesos de proyección térmica requieren dos tipos de energía: térmica y cinética. Los productores de energía térmica son en la actualidad la llama de gas combustible/oxígeno, el arco voltaico, el rayo de plasma y recientemente el rayo láser; la energía térmica es necesaria para fundir y aplicar el material de aporte; la energía cinética junto con la velocidad de las partículas influye en la dureza de la capa, en la cohesión del material de recubrimiento y en su adherencia al material base, éste tipo de energía varía mucho entre los diferentes métodos de proyección térmica, y además depende del material de recubrimiento y del tamaño de las partículas<sup>2</sup>.

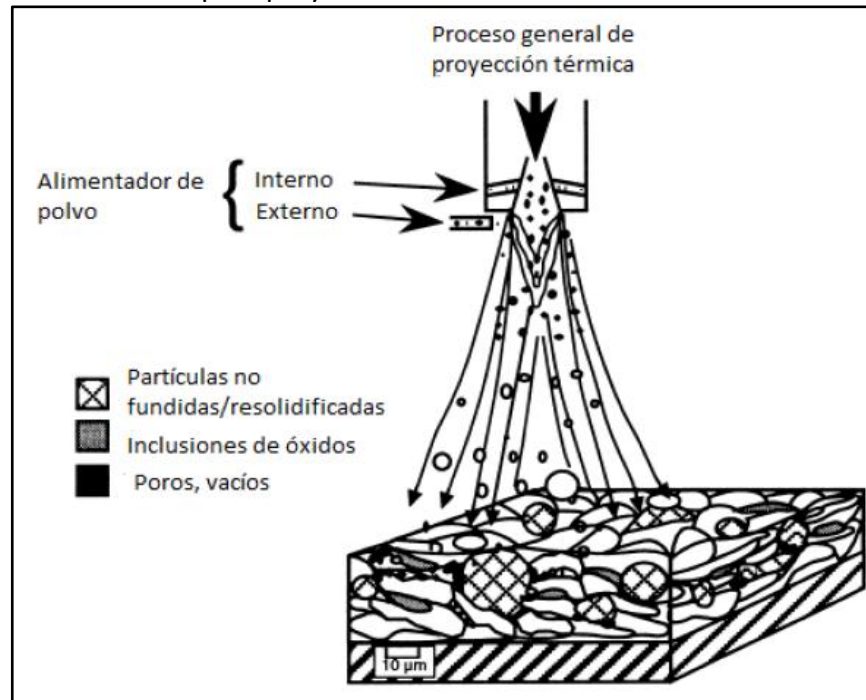
---

<sup>2</sup> ABELLO, Linde. Proyección térmica de superficies, Linspray. España. 2002. p. 2.

La figura 1-2, muestra el proceso de recubrimiento con sus características más relevantes, incluyendo las partículas no fundidas, poros, vacíos, inclusiones.

La materia prima está por lo general en forma de polvo con una distribución de tamaños de partícula. Cuando estos materiales en polvo son alimentados a la antorcha, porciones de la distribución de polvo toman caminos preferenciales de acuerdo a su inercia

Figura. 1-2 Recubrimiento por spray térmico



Fuente:

<http://www.bdigital.unal.edu.co/5222/1/lauramarceladimatecastellanos.2011.parte1.pdf>

Actualmente se trabaja en la automatización y optimización de los sistemas con base en el diseño de nuevas boquillas, con lo cual la adherencia de la capa metalizada con el sustrato es superior respecto a los métodos y procedimientos utilizados con anterioridad, además se disminuyen los costos de operación y la temperatura generada por el proceso en el sustrato<sup>3</sup>.

Varios factores pueden considerarse en el momento de determinar el método de proyección térmica requerido, entre ellos están:

<sup>3</sup> ANTIQUERA, J. VALENCIA, E. Caracterización microestructural y propiedades mecánicas de recubrimientos por metalizado. Congreso conamet/sam 2004.

- *Material:* es necesario establecer el tipo de material de aporte utilizado en el recubrimiento de acuerdo a una caracterización que tiene en cuenta el tamaño de partícula del material en polvo y su composición.
- *Distancia al sustrato:* es fundamental establecer la distancia entre la boquilla de expulsión del recubrimiento y la superficie a revestir, para que las partículas lleguen a fundirse y adherirse al sustrato.
- *Fuente de energía:* la cantidad de material que es capaz de fundir la fuente de energía debe tenerse en cuenta al realizar el recubrimiento junto con la temperatura de la llama y la velocidad de las partículas.
- *Energía de las partículas:* la calidad del recubrimiento está determinada por la energía de las partículas que impactan sobre el sustrato y las capas que se forman.

### 1.2.2 Combustión por llama

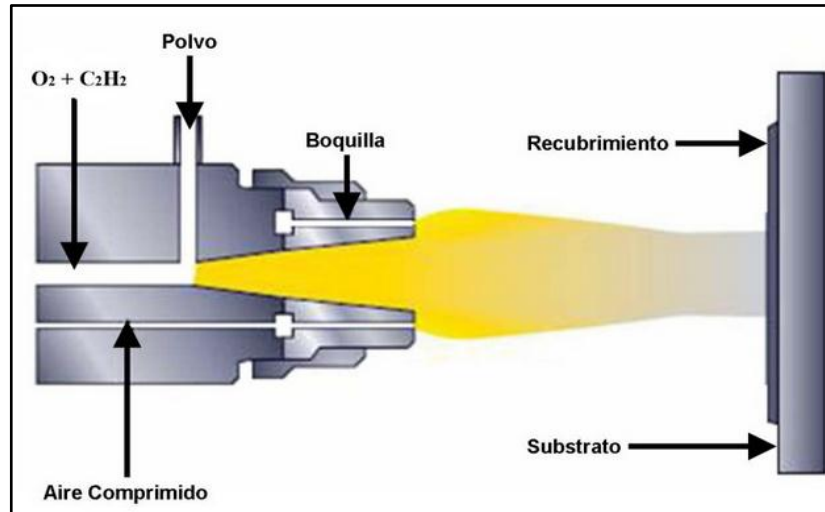
Este método usa la energía química de combustión de un gas combustible como hidrogeno ó acetileno con oxígeno, como fuente para fundir el material del recubrimiento. En la figura 1-3, muestra cómo el material de aporte que puede ser polvo, es lanzado sobre el sustrato, este puede ser introducido de forma axial o radial en la antorcha, las partículas de material son fundidas total o parcial en la llama en dirección al sustrato, con la ayuda de aire comprimido se aceleran donde se aplastan y solidifican rápidamente formando láminas llamadas “splats”.

De forma más detallada, el material de aporte se inyecta a temperatura ambiente, en donde la aleación micro-pulverizada y la llama acetilénica tienen la misma trayectoria, lo que da origen a una transferencia de calor de llama a la partícula, por lo tanto, la partícula es calentada y eleva sucesivamente su temperatura, ésta permanece el tiempo suficiente en la llama como para ser fundida y es fuertemente acelerada por la expansión de los gases de combustión e impactan sobre la superficie de la pieza deformando las partículas y apropiándose de la rugosidad con que previamente se ha preparado la pieza, por lo tanto se entran mecánicamente<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> GAONA, Mireia. Recubrimientos biocompatibles obtenidos por Proyección Térmica y estudio in vitro de la función osteoblástica. Trabajo de grado presentada para optar al título de Ciencias químicas. Universidad de Barcelona. Departamento de ciencia de los materiales e Ingeniería Metalúrgica, 2007. 13 p.

Figura. 1-3 Proyección térmica por llama

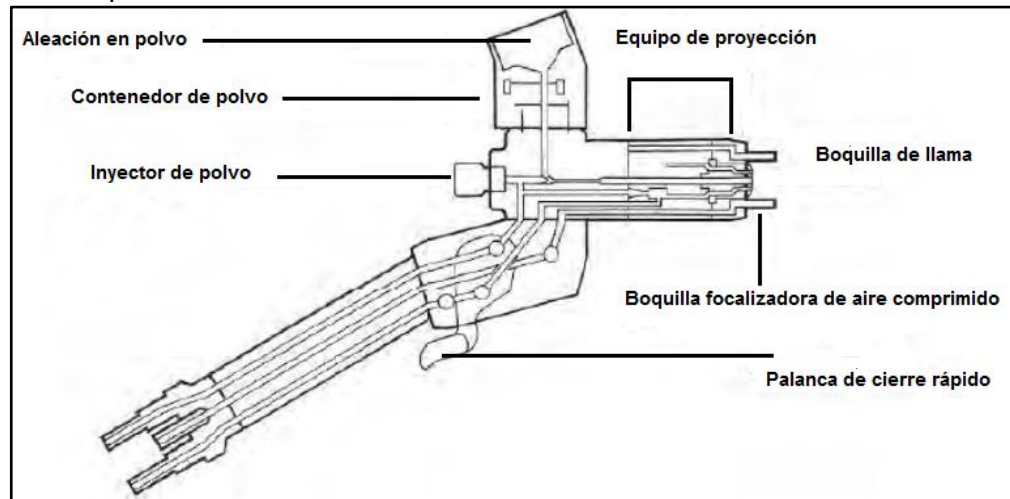


Fuente: <http://tecnoatocha.files.wordpress.com/2010/07/figura-esquema-antorcha-pf-castellano-copia.jpg>

El equipo consta de una fuente de calor que es una llama proveniente de la mezcla de gas combustible y oxígeno, adicionalmente emplea un alimentador de polvos, éste a su vez es almacenado en una tolva en la parte superior de la antorcha, el cual es proyectado dentro de la llama por una cantidad pequeña de oxígeno, que es separada del suministro de gas.

En la figura 1-4, se muestra las partes de una antorcha de recubrimiento utilizada para la protección de superficies.

Figura. 1-4 Esquema de la antorcha



Fuente: CASTELLANOS, Laura. Resistencia a la corrosión en recubrimientos comerciales Metaceram 25050 y Proxon 21071 producidos con el sistema de proyección térmica por llama.

## 1.3 PÁRAMETROS DEL RECUBRIMIENTO POR PROYECCIÓN TÉRMICA

### 1.3.1 Polvo de proyección

Existen diversos tipos de polvo con composición específica de acuerdo a las características del recubrimiento dentro de los que se puede encontrar:

- Polvos de carburo: son utilizados para protección contra el desgaste de alta y baja temperatura. Dependiendo de la aplicación del revestimiento y el tipo de desgaste, se tienen polvos de carburo de cromo o carburos de tungsteno para recubrimientos térmicos de pulverización.
- Aleaciones: dependiendo de las propiedades de recubrimiento requerido y el dispositivo de aplicación a utilizar, se utiliza una variedad de técnicas de fabricación incluyendo atomización de gas argón, la sinterización al vacío, aglomeración y físico-mezcla para producir polvos avanzados, obteniéndose aleaciones tales como NiCr, NiCrAlY, FeCrBSiC, aceros, bronce.
- Cerámicos: se utilizan para incrementar para la protección contra el calor y el desgaste. Existen polvos de baja conductividad térmica de revestimiento de barrera (TBC) y polvos de alúmina de alta pureza, polvos de recubrimientos con itria, fabricaciones de semiconductores avanzados como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>.

El tamaño y morfología del polvo influyen en las condiciones de alimentación de él a la antorcha, así como en el intercambio de calor tanto dentro de la cámara de combustión como durante el vuelo<sup>5</sup>. Es fundamental tener en cuenta las características del polvo como el tamaño, la distribución granulométrica, estas permiten deducir la forma de transmisión de calor entre la llama y la partícula.

### 1.3.2 Gases de aporte

La elección de cada uno de los gases para los procesos de recubrimiento es de vital importancia para conseguir las óptimas características en las capas aplicadas. Para la proyección térmica con llama se utiliza el acetileno, que posee una regulación neutra de la llama, la potencia y la temperatura lo suficientemente alta para fundir el material que posee el recubrimiento.

---

<sup>5</sup> GAONA, Mireia. Recubrimientos biocompatibles obtenidos por Proyección Térmica y estudio in vitro de la función osteoblástica. Trabajo de grado presentada para optar al título de Ciencias químicas. Universidad de Barcelona. Departamento de ciencia de los materiales e Ingeniería Metalúrgica, 2007.20 p.

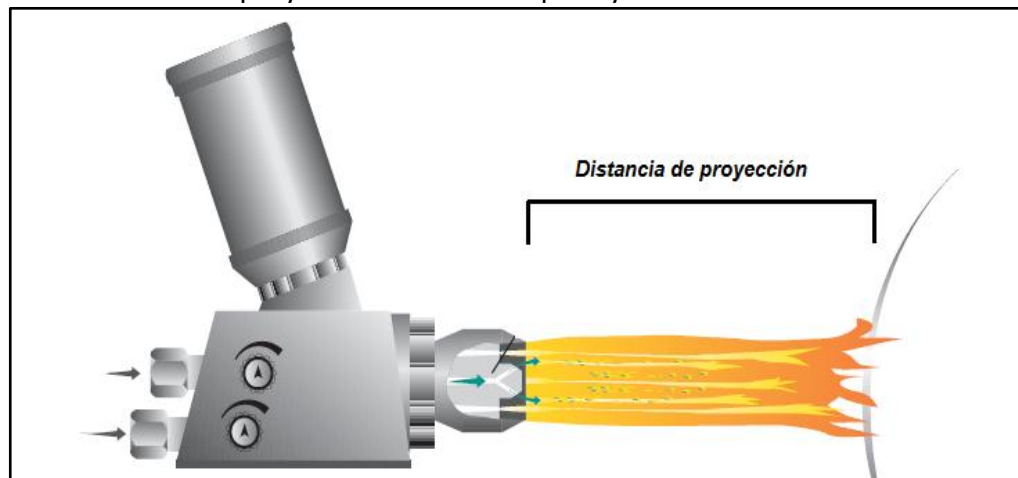
El ajuste de la llama neutra es particularmente importante si se pretende conseguir capas de recubrimiento con bajo porcentaje de óxido. La llama que tiene más acetileno se llama reductora y la que tiene más oxígeno se llama oxidante<sup>6</sup>. Se puede utilizar un gas adicional como nitrógeno y argón que permiten proyectar las partículas de polvo, y un gas que aumenta la presión a la hora de realizarse la combustión.

Existen combinaciones posibles de gases de acuerdo a las características del recubrimiento por proyección térmica usando llama, entre ellas está: acetileno-oxígeno, hidrogeno-oxígeno, propano-oxígeno; la configuración de la antorcha permite el uso de estas combinaciones y a su vez se disminuyen costos de aplicación de diversos recubrimientos.

### 1.3.3 Distancia de proyección

En el momento en que la llama funde las partículas del recubrimiento salen de la antorcha e impactan con la superficie del sustrato, la distancia de proyección es la longitud entre la boquilla de la antorcha y la superficie del sustrato, como se indica en la figura 1-5. Una característica de este tipo permite obtener el recubrimiento con las propiedades deseadas, teniendo en cuenta que una corta distancia sobrecalienta el sustrato y una distancia sobredimensionada hace que las partículas se enfríen y pierdan su capacidad de deformación y adherencia.

Figura. 1-5 Distancia de proyección entre la boquilla y el sustrato



Fuente: ABELLO, L. Proyección térmica de superficies, Linspray. España 2002

<sup>6</sup> ABELLO, Linde. Proyección térmica de superficies, Linspray. 2 p. España 2002

### 1.3.4 Velocidad de desplazamiento de la antorcha

La velocidad con la cual se desplaza el haz de proyección a través de la superficie del sustrato influye directamente en la formación y en la cantidad de materia que se deposita en cada capa<sup>7</sup>, ésta característica influye en la estructura final del recubrimiento que puede tener un espesor reducido o excesivo de partículas, si la velocidad no es la correcta. Hay grandes diferencias de acuerdo al tipo de recubrimiento, en la tabla 1-1 se establecen las características específicas que se pueden determinar en cada recubrimiento.

Tabla 1-1. Diversas tipos de proyección térmica

	<b>Velocidad de la partícula (m/s)</b>	<b>Adherencia (MPa)</b>	<b>Contenido del óxido (en metales)</b>	<b>Porosidad %</b>	<b>Velocidad de la deposición (kg/h)</b>	<b>Espesor típico del depósito (mm)</b>
<b>Llama</b>	40	8	10-15	10-15	1-10	0.2-1.0
<b>Arco</b>	100	10-30	10-20	5-10	6-60	0.2-1.0
<b>Plasma</b>	200-300	20-70	1-3	5-10	1-5	0.2-2
<b>HVOF</b>	600-1000	70	1-2	1-2	1-5	0.2-2

Fuente: CASTELLANOS, L. Resistencia a la corrosión en recubrimientos comerciales Metaceram 25050 y Proxon 21071 producidos con el sistema de proyección térmica por llama. Universidad Nacional de Colombia, 2011

## 1.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS

Las técnicas de caracterización son aquellos ensayos realizados sobre los materiales de los sustratos y de los recubrimientos, con los objetivos de poder realizar una descripción cualitativa y en lo posible cuantitativa de la geometría, topografía y microestructura de los materiales involucrados en los experimentos.

Cuando se realiza un recubrimiento a una pieza o elemento es importante establecer una caracterización en aspectos como morfología, microestructura y topografía de los mismos estableciendo diferencias de este tipo con el fin de hacer comparaciones con otros parámetros iniciales, y precisar datos que definen la calidad del recubrimiento. Para ello se encuentran varias formas de hacer la caracterización de los recubrimientos, como:

---

<sup>7</sup> RESTREPO, E. VARGAS, F. LOPEZ, M. CARDONA, R. DUARTE, G. Elaboración de recubrimientos cerámicos mediante proyección térmica por combustión a partir de residuos sólidos industriales. Colombia. 2012. p. 1178. Revista Materia. ISSN 1517-7076

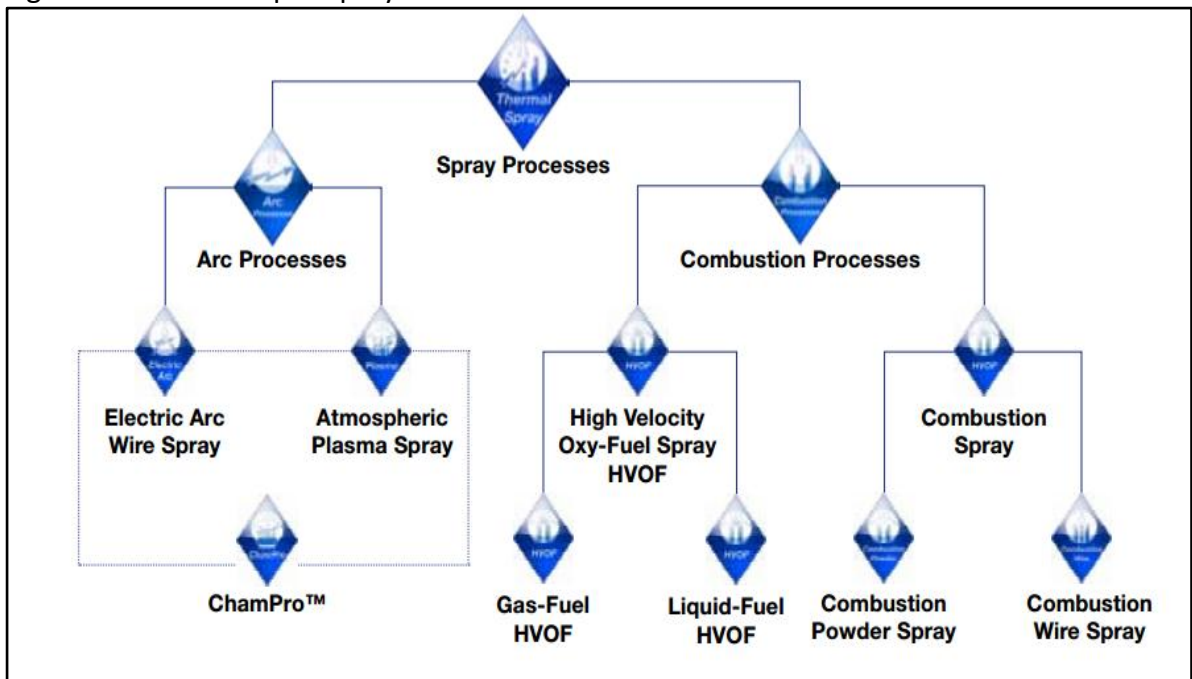


- ✓ Difracción de rayos X
- ✓ Microscopía de barrido electrónico (SEM)
- ✓ Fluorescencia de Rayos X
- ✓ Microscopía láser confocal

## 1.5 TIPOS DE RECUBRIMIENTO POR PROYECCIÓN TÉRMICA

La empresa Sulzer Metco<sup>8</sup> cuenta con sistemas para todas las aplicaciones de proyección térmica, utilizados en diversos campos de proyección térmica como indica la figura 1-6, de acuerdo al tipo de aplicación se elige el proceso y todos los elementos necesarios para el cumplimiento de su función de acuerdo al recubrimiento a realizar.

Figura. 1-6 Procesos por Spray

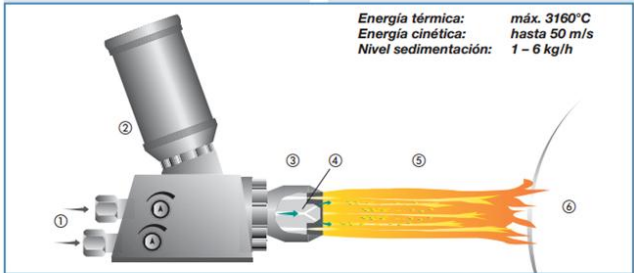
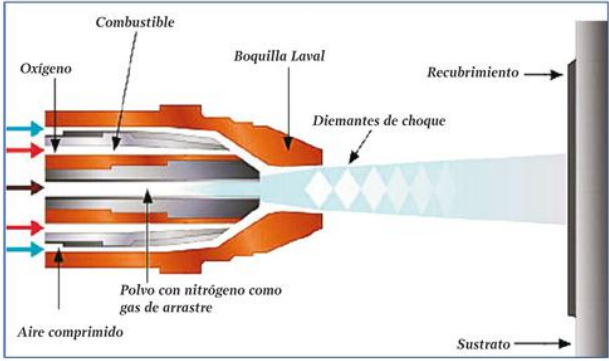


Fuente: [http://www.jya.cl/wp-content/uploads/2013/02/Equipment\\_Guide\\_EN8\\_web.pdf](http://www.jya.cl/wp-content/uploads/2013/02/Equipment_Guide_EN8_web.pdf)

En la tabla 1-2 se hace una descripción del proceso, y su esquema correspondiente de los diferentes tipos de recubrimientos por proyección.

<sup>8</sup> Sulzer, Metco. Thermal Spray Equipment guide. [Online] 2010. [http://www.jya.cl/wp-content/uploads/2013/02/Equipment\\_Guide\\_EN8\\_web.pdf](http://www.jya.cl/wp-content/uploads/2013/02/Equipment_Guide_EN8_web.pdf)

Tabla 1-2. Diversas tipos de proyección térmica

TIPOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA		
PROCESO	DESCRIPCIÓN	ESQUEMA <sup>9</sup>
<p><b>Proyección térmica con llama usando polvo</b></p>	<p>En la proyección térmica con llama, usando polvo el material de aportación en forma de polvo se funde en una llama de acetileno/oxígeno y con la ayuda de gases de combustión en expansión es lanzado sobre la superficie de la pieza a tratar. Gracias a proceso térmico se mejora la adherencia del material de recubrimiento en la pieza base; el recubrimiento se hace hermético a gases y líquidos.</p>	 <p>Energía térmica: máx. 3160°C Energía cinética: hasta 50 m/s Nivel sedimentación: 1 – 6 kg/h</p> <p><b>Proyección térmica con llama, usando polvo</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① Acetileno/Oxígeno</li> <li>② Recipiente de polvo</li> <li>③ Boquilla de soplete</li> <li>④ Gas transportador + polvo</li> <li>⑤ Llama de Acetileno/Oxígeno y partículas del material de recubrimiento</li> <li>⑥ Pieza de trabajo</li> </ol>
<p><b>Proyección térmica de alta velocidad HVOF</b></p>	<p>Este tipo de proyección es la que permite obtener recubrimiento con una mayor adherencia al sustrato y mayor resistencia a la corrosión. Se atomizan materiales fundidos o semi-fundidos sobre la superficie mediante una corriente de gas de alta temperatura y alta velocidad, produciendo un revestimiento denso que puede ser rectificado para obtener un acabado de superficie de gran calidad.</p>	 <p>Combustible Oxígeno Boquilla Laval Diamantes de choque Recubrimiento Polvo con nitrógeno como gas de arrastre Aire comprimido Sustrato</p>

<sup>9</sup> ABELLO, Linde. Proyección térmica de superficies, Linspray España 2002. pp 3-8.

Tabla 1-3. Continuación

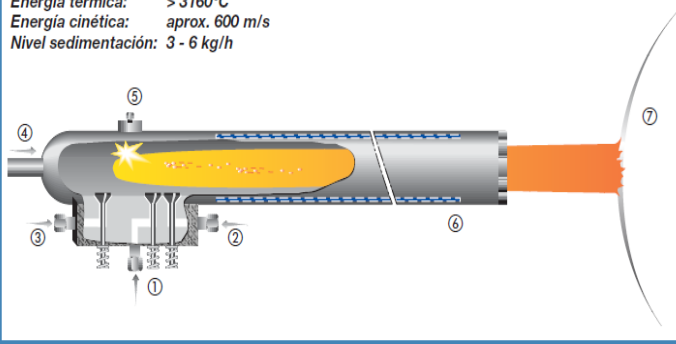
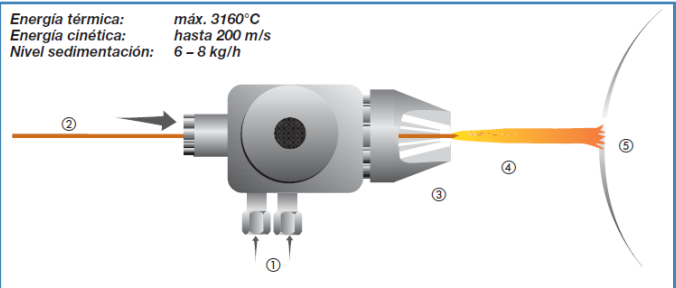
TIPOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA		
PROCESO	DESCRIPCIÓN	ESQUEMA
<p><b>Proyección térmica por detonación</b></p>	<p>La proyección térmica por choque de llama o detonación es un proceso de aplicación intermitente. Consiste en un tubo de salida, en cuyo extremo final se encuentra la cámara de combustión, dentro de ésta se hace detonar con una chispa, la mezcla aportada de acetileno, oxígeno y material de recubrimiento en polvo; la onda de choque que se produce en el tubo, acelera las partículas del material, éstas son calentadas en el frente de llama y proyectadas a gran velocidad en un chorro dirigido sobre la superficie preparada de la pieza.</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Energía térmica: &gt; 3160°C                      Energía cinética: aprox. 600 m/s                      Nivel sedimentación: 3 - 6 kg/h</p>  <p><i>Proyección térmica por detonación</i></p> <p>① Acetileno                      ④ Polvo de recubrimiento                      ⑥ Tubo de salida con refrigeración por agua                      ② Oxígeno                      ⑤ Dispositivo de ignición                      ⑦ Pieza de trabajo                      ③ Nitrógeno</p> </div>
<p><b>Proyección térmica por hilo</b></p>	<p>Para la proyección térmica con llama, usando hilo o varilla, se va fundiendo de forma continua el material de aportación en el centro de una llama de acetileno/oxígeno. Con la ayuda de un gas pulverizador, por ejemplo aire comprimido o nitrógeno, se separan del área de fusión diminutas partículas en forma de gotas, que son lanzadas sobre la superficie ya preparada de la pieza a tratar.</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Energía térmica: máx. 3160°C                      Energía cinética: hasta 200 m/s                      Nivel sedimentación: 6 - 8 kg/h</p>  <p><i>Proyección térmica con llama, usando hilo</i></p> <p>① Acetileno/Oxígeno                      ③ Boquilla del soplete                      ⑤ Pieza de trabajo                      ② Hilo o varilla                      ④ Llama de Acetileno/Oxígeno</p> </div>

Tabla 1-4. Continuación

TIPOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA		
PROCESO	DESCRIPCIÓN	ESQUEMA
<p><b>Proyección térmica por arco voltaico</b></p>	<p>Se usan dos hilos como electrodo, que pueden ser de tipo análogo y se funden en un arco con la ayuda de un gas pulverizador, como aire comprimido, son proyectados sobre la superficie ya preparada de la pieza de trabajo. La metalización con arco es un sistema de aplicación de hilo de gran rendimiento, pero sólo pueden aplicarse de esta forma materiales eléctricamente conductores. Usando nitrógeno o argón como gas pulverizador, se puede evitar en gran parte la oxidación lógica de los materiales de base.</p>	<p>Energía térmica: aprox. 4000°C  Energía cinética: aprox. 150 m/s  Nivel sedimentación: 8 – 20 kg/h</p> <p>Proyección térmica con arco</p> <p>① Gas pulverizador      ③ Cabezal del soplete      ⑤ Pieza de trabajo  ② Gas protector      ④ Hilo eléctricamente conductivo</p>
<p><b>Proyección térmica con láser</b></p>	<p>Se introduce en el rayo láser un material de recubrimiento en forma de polvo, usando una tobera especial para ello. El rayo láser funde tanto el polvo como también una parte mínima de la superficie de material base (micras), el material de recubrimiento aportado se une metalúrgicamente con el material de base. Para proteger el baño de fusión se usa un gas protector.</p>	<p>Energía térmica: &gt; 10,000°C  Energía cinética: &gt; 1 m/s  Nivel sedimentación: 1 – 2 kg/h</p> <p>Proyección térmica con láser</p> <p>① Rayo láser      ③ Polvo  ② Gas protector      ④ Pieza de trabajo</p>

Tabla 1-5. Continuación

<b>TIPOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA</b>											
PROCESO	DESCRIPCIÓN	ESQUEMA									
<b>Proyección térmica con plasma</b>	<p>En la proyección térmica con plasma se funde el polvo de recubrimiento dentro o fuera de la antorcha de inyección en un rayo de plasma y se proyecta sobre la superficie de la pieza a tratar. El plasma es producido con un arco voltaico, que está concentrado a través de argón, helio, nitrógeno, hidrógeno o en una mezcla de estos gases. Los gases son disociados e ionizados en este proceso, alcanzando enormes velocidades de salida, y durante su recombinación ceden su energía térmica a las partículas del material de recubrimiento.</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p><i>Energía térmica:</i> hasta 20,000 K  <i>Energía cinética:</i> hasta 450 m/s  <i>Nivel sedimentación:</i> 4 – 8 kg/h</p> <p style="text-align: center;"><i>Proyección térmica con plasma</i></p> <table style="width: 100%; font-size: small;"> <tr> <td>① Gas inerte</td> <td>④ Material de recubrimiento en polvo</td> <td>⑥ Ánodo</td> </tr> <tr> <td>② Agua de refrigeración</td> <td>⑤ Cátodo</td> <td>⑦ Pieza de trabajo</td> </tr> <tr> <td>③ Corriente continua</td> <td></td> <td></td> </tr> </table> </div>	① Gas inerte	④ Material de recubrimiento en polvo	⑥ Ánodo	② Agua de refrigeración	⑤ Cátodo	⑦ Pieza de trabajo	③ Corriente continua		
① Gas inerte	④ Material de recubrimiento en polvo	⑥ Ánodo									
② Agua de refrigeración	⑤ Cátodo	⑦ Pieza de trabajo									
③ Corriente continua											
<b>Proyección térmica con plasma de arco transferido PTA</b>	<p>En el proceso PTA, la superficie del sustrato es fundida así como el material del recubrimiento en forma de polvo, para lograr la fusión se utiliza un plasma de alta densidad transferido (el polvo se localiza en el sustrato). Como gases generadores del plasma se utiliza el argón, el helio o las mezclas de estos. El material del recubrimiento es transportado por una corriente de gas, fundido por el plasma y mezclado con la superficie del sustrato. Todo el proceso se desarrolla bajo una atmósfera gaseosa protectora, la dilución entre el sustrato y el material del recubrimiento es mínima.</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p><i>Energía térmica:</i> hasta 20,000 K  <i>Energía cinética:</i> hasta 50 m/s  <i>Nivel sedimentación:</i> hasta 20 kg/h</p> <p style="text-align: center;"><b>PTA</b>  <i>– Arco Plasma transferido</i></p> <table style="width: 100%; font-size: small;"> <tr> <td>① Corriente continua</td> <td>⑤ Ánodo</td> </tr> <tr> <td>② Gas Plasma</td> <td>⑥ Cátodo</td> </tr> <tr> <td>③ Polvo + gas de transporte</td> <td>⑦ Refrigeración por agua</td> </tr> <tr> <td>④ Gas protector</td> <td>⑧ Pieza de trabajo</td> </tr> </table> </div>	① Corriente continua	⑤ Ánodo	② Gas Plasma	⑥ Cátodo	③ Polvo + gas de transporte	⑦ Refrigeración por agua	④ Gas protector	⑧ Pieza de trabajo	
① Corriente continua	⑤ Ánodo										
② Gas Plasma	⑥ Cátodo										
③ Polvo + gas de transporte	⑦ Refrigeración por agua										
④ Gas protector	⑧ Pieza de trabajo										

Tabla 1-6. Continuación

TIPOS DE PROYECCIÓN TÉRMICA		
PROCESO	DESCRIPCIÓN	ESQUEMA
<p><b>Proyección térmica fría de alta velocidad</b></p>	<p>En la proyección térmica fría de alta velocidad la parte de energía cinética del proceso (velocidad de las partículas) es incrementada, mientras que la correspondiente a la energía térmica es reducida, lo que conduce a recubrimientos prácticamente libres de óxidos; se requiere el calentamiento de las partículas a proyectar a temperaturas cercanas a la de fusión.</p>	<p> <i>Energía térmica:</i> máx. 600°C  <i>Energía cinética:</i> 550 – 1000 m/s  <i>Nivel sedimentación:</i> 3 – 15 kg/h         </p> <p> <b>Proyección térmica fría</b>            ① Gas de transporte      ③ Tobera de-Laval      ⑤ Pieza de trabajo            ② Gas de proceso      ④ Chorro supersónico de gas y pulverización de partículas         </p>

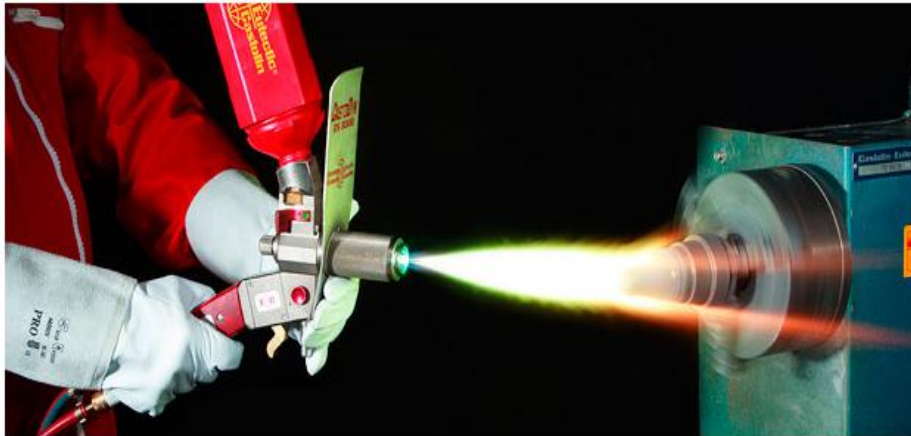
Fuente: Los Autores.

## 1.6 EQUIPOS DE RECUBRIMIENTO EXISTENTES

### 1.6.1 Proceso manual

La forma más común de realizar el recubrimiento por proyección es de forma manual, el operario debe tener en cuenta prácticas como limpieza de la pieza, suministro del material de aporte, inspección visual del recubrimiento, controlar el movimiento de la antorcha, proteger la pieza ante posibles golpes etc. En la figura 1-7 se observa el operario realizando el recubrimiento con sus elementos de protección.

Figura. 1-7 Recubrimiento por proyección térmica manual



Fuente: [http://www.metalia.es/guiadeempresas/Castolin\\_Tratamientos/default.asp](http://www.metalia.es/guiadeempresas/Castolin_Tratamientos/default.asp)

### 1.6.2 Procesos Automáticos

#### 1.6.2.1 Equipo de arco eléctrico y de Combustión Metco 8400

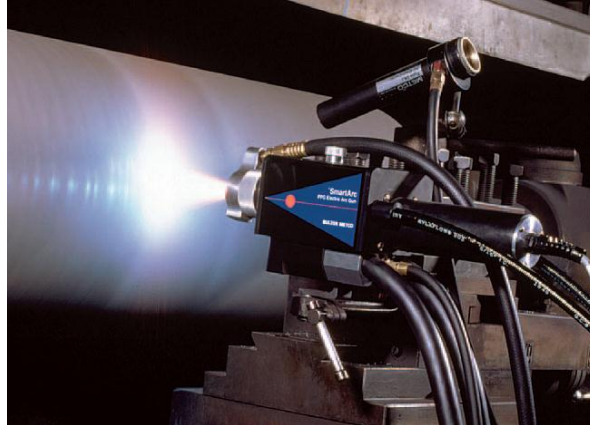
En la figura 1-8 se muestra este sistema, donde las partículas desprendidas se proyectan hacia la superficie a recubrir mediante una corriente de aire comprimido de alta velocidad, la alta temperatura (6500°C.) producida por el arco, y la ausencia de productos de combustión, permite la obtención de capas muy densas, con alta tensión de adherencia, resistencia al despegue, entre el recubrimiento y el sustrato<sup>10</sup>. Dentro de las

<sup>10</sup> Sulzer, Metco. Thermal Spray Equipment guide. [Online] 2010. [http://www.jya.cl/wp-content/uploads/2013/02/Equipment\\_Guide\\_EN8\\_web.pdf](http://www.jya.cl/wp-content/uploads/2013/02/Equipment_Guide_EN8_web.pdf)



aplicaciones típicas se encuentra: capacitores, recubrimientos anticorrosivos (Zn, Al y ZincAlum), garrafas y botellones de gas, rodillos de impresión, varillas de perforación, gasoductos y cigüeñales

Figura. 1-81 Equipo de arco eléctrico y de combustión Metco 8400



Fuente: <http://www.jya.cl/proyeccion-termica/>

### 1.6.2.2 *Planta piloto Metco*

Este equipo marca Sulzer Metco mostrado en la figura 1-9 permite obtener recubrimientos resistentes al desgaste y a la corrosión con la técnica de la proyección térmica de alta velocidad, también conocida como proceso HVOF, de polvos metálicos. Los polvos metálicos utilizados materiales base cobre, níquel.

Figura. 1-9 Planta piloto para la obtención de recubrimientos, a la izquierda parte exterior a la derecha parte interior



Fuente: <http://www.upc.edu/sct/es/equip/804/planta-piloto-proyeccion-termica-alta-velocidad-obtencion-recubrimientos.html>



### **1.6.2.3 Equipo de recubrimientos para trenes de aterrizaje de aviones**

Este sistema robótico de rociado térmico fue diseñado para aplicar cromo HVOF en recubrimientos de reemplazo para componentes de los trenes de aterrizaje en aviones. El robot de seis brazos M7 10i FANUC<sup>11</sup> mostrado en la figura 1-10, se encarga de recubrir partes complejas que hacen parte del avión. Puede trabajar de forma horizontal o vertical, el control del movimiento es preciso.

Figura. 1-20 Equipo Fanuc M7-10i



Fuente: <http://equiposdeabrasion.com.mx/PrgsvSyTr.ph>

### **1.6.2.4 Equipo de Spray con Plasma para recubrimientos de discos de ventilador**

Este sistema robótico de rociado térmico de discos de ventilador<sup>12</sup> fue diseñado para aplicar cromo HVOF en recubrimientos. El equipo cuenta con un brazo manipulador vertical encargado de desplazar la antorcha de plasma que a su vez puede girarse, la versatilidad que posee logra recubrimientos en ranuras rectas y angulares, puede aplicar recubrimientos de spray con plasma de Cobre, Níquel, en la figura 1-11, se indica el equipo mencionado con la disposición para su operación.

---

<sup>11</sup> Equipos de abrasión. [Online] 2009. <http://equiposdeabrasion.com.mx/PrgsvSyTr.php/>.

Figura. 1-31 Sistema de Spray con Plasma para recubrimientos de discos de ventilador



Fuente: <http://equiposdeabrasion.com.mx/PrgsvSyTr.php>

#### **1.6.2.5 Equipo multiprocesos de Spray Térmico**

Este sistema busca reacondicionar componentes de aeronaves y es usado para proteger componentes aeroestructurales y turbinas, su mecanismo cuenta con un robot de 4 ejes que le permite realizar el recubrimiento de HVOF, y arco, posee control CNC de Siemens que le admite un movimiento preciso en todos los ejes de la máquina, en la figura 1-12 se observa una vista general de éste sistema de aplicación de recubrimientos. Su estructura permite una rotación de huso de gran velocidad, un huso secundario provee la capacidad de movimiento en varias direcciones para procesar discos de ventilador y un huso horizontal que da rotación a ejes largos colocados horizontalmente en los montajes del rodillo.

Figura. 1-4 Sistema multiprocesos



Fuente: <http://equiposdeabrasion.com.mx/PrgsvSyTr.php>

## 1.7 SISTEMA MECÁNICO

Existen diversas metodologías a tener en cuenta en el momento de realizar el diseño mecánico de un producto. De acuerdo a las restricciones impuestas para su desarrollo existen criterios que permiten enfocar el desempeño del componente en los ámbitos en que va a trabajar.

Generalmente hay varios requisitos de rendimiento en el diseño de un equipo. La mayoría de las literaturas de diseño relacionados, sin embargo, sólo se refieren a los dos criterios básicos de diseño: espacio de trabajo y condiciones a efectuar.

El diseño mecánico de un equipo requiere múltiples criterios a tener en cuenta, entre ellos el espacio de trabajo, la precisión, rigidez, velocidad en sus actuadores, fuerza máxima, entre otros. Para esto es necesario establecer el espacio de trabajo donde se desarrolla el proceso, teniendo en cuenta que el diseño y desarrollo de productos requiere no solamente el manejo de conceptos básicos de diseño mecánico convencional, sino la selección adecuada de materiales y procesos de fabricación que permitan obtener piezas que cumplan con requerimientos funcionales<sup>13</sup>.

Una de las metodologías utilizadas por la ingeniería concurrente o diseño integrado de productos es el diseño para manufactura DFM. Esta técnica busca mejorar la fabricación de piezas partiendo de geometrías, tolerancias, y valores con el fin de disminuir costos en los elementos fabricados, esto permite simplificar el ensamble de productos y generar alternativas de diseño, logrando un aprovechamiento de los recursos.

## 1.8 SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

Existen diversos sistemas de dosificación de acuerdo al tipo de aplicación, todos buscan la misma función que es fraccionar de forma precisa y autónoma el polvo a suministrar, algunos son diseñados de forma particular y otros en serie pues su uso es común, por ejemplo en el ámbito farmacéutico, industrial, alimentario, de recubrimiento, químico, mecánico entre otros. La configuración para el desempeño de estos sistemas está directamente relacionada con la precisión, la cantidad, y el tipo de polvo.

Hay diversos métodos para la medición de polvo y dispensación: métodos neumáticos, la dosificación volumétrica, dosificación gravimétrica, tornillo y dispensadores de barrena, electrostática de control de medición, acústica o ultrasónica con dispensadores de polvo

---

<sup>13</sup> Equipos de abrasión. [Online] 2009. <http://equiposdeabrasion.com.mx/PrgsvSyTr.php/>.

controlados y dispositivos de alimentación en polvo basados en la excitación de una onda en una línea de transmisión de ultrasonidos con pérdidas<sup>14</sup>.

Un sistema de transporte de polvo es uno de los equipos necesarios en diversos campos de la industria y es fundamental para una mayor productividad y la automatización de la producción de la misma. Diversos campos industriales requieren capacidad de manejo de polvo con procesos de mezcla muy precisos que le permitan tener un control exacto de alimentación de polvo.

Algunos de los equipos de uso industrial se presentan a continuación, sus títulos se presentan en inglés por hacer referencia a sus nombres técnicos:

### **1.8.1 Pharma Coperion K-Tron**

En el sistema Pharma Coperion K-Tron<sup>15</sup>, un alimentador de doble tornillo suministra polvo ya sea en una configuración volumétrica o gravimétrica. En la configuración gravimétrica el peso del polvo se mide continuamente y los controles para mantener la reducción de peso por unidad de tiempo es invariable mediante el ajuste de la velocidad del alimentador de un tornillo gemelo. Se hace un ajuste en la velocidad para mantener un flujo de masa consistente, o peso por unidad de tiempo, la unidad puede ser validada para probar que un flujo constante y uniforme de polvo está siendo entregado al equipo de revestimiento.

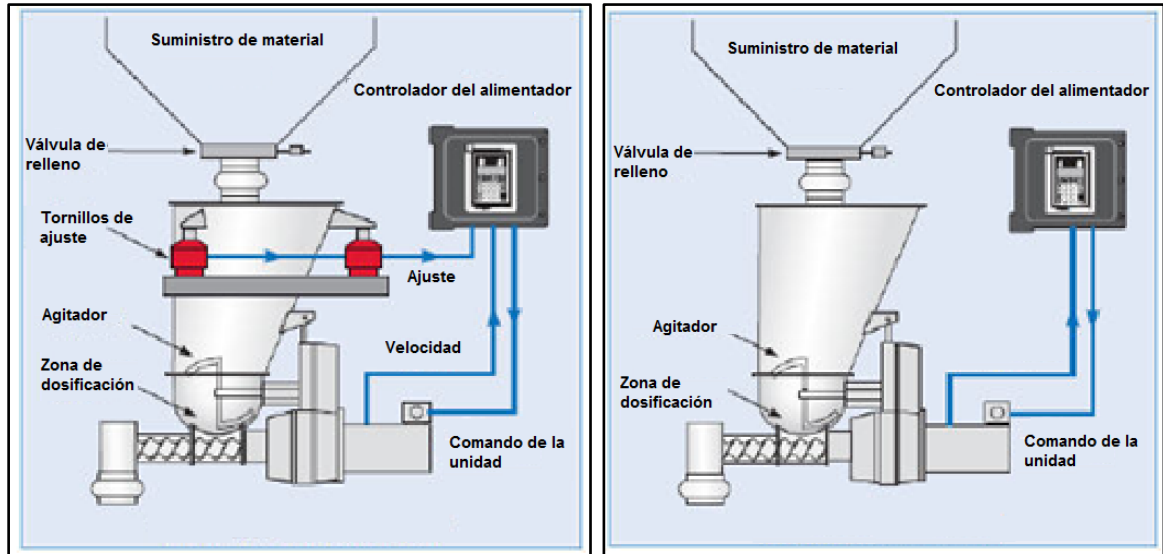
Además, midiendo el flujo de material en general entregado al equipo de recubrimiento en peso, la cantidad total de polvo suministrada se puede calcular. En la figura 1-13 se muestra el sistema descrito en su modo gravimétrico y volumétrico.

---

<sup>14</sup> LOU, Yunjiang. ZHANG, Dongjun. LI, Zexiang. Optimal design of a parallel machine based on multiple criteria. En: International conference on robotics and automation. Proceedings of the 2005 IEEE.

<sup>15</sup> MURIMI, E. KIHU, J. Nyakoe G. MUTULI, S. A survey of ultrasonic waves in powder transportation.2012

Figura. 1-5 Sistema Pharma Coperion K-Tron- a la izquierda modo gravimétrico, a la derecha modo volumétrico



Fuente: <http://www.labcompare.com/General-Laboratory-Equipment/1004-Laboratory-Powder-Dispenser-Benchtop-Powder-Dispensers/>

En el modo volumétrico el alimentador de doble tornillo funciona a velocidad constante. Por lo general con materiales que fluyen son altamente cohesivos, y el uso de tornillos puede generar el desplazamiento de grandes tasas de polvo, por lo que se generan filtraciones, y en este caso el flujo de masa constante no puede ser validado.

### 1.8.2 Gravimetric Dispenser

Este tipo de dosificador es ideal para manejo de sustancias no solo en polvo sino granular de gran volumen, debido a las dimensiones que posee tiene gran capacidad de trabajo, con un rango de rendimiento de  $10\text{dm}^3/\text{h}$  hasta  $10\text{m}^3/\text{h}$  con un nivel de exactitud de  $\pm 0,25$  a  $1\%$ . Este sistema cuenta con celdas de carga ubicadas debajo del soporte, tiene una tolva de recepción de polvo sobre los marcos, presentado en la figura 1-14. En la salida de la tolva se tiene un extractor de dosificación con un agitador mecánico suave que posee o un tornillo o una bobina, y un motorreductor de velocidad variable.

Figura. 1-6 Gravimetric dispenser system

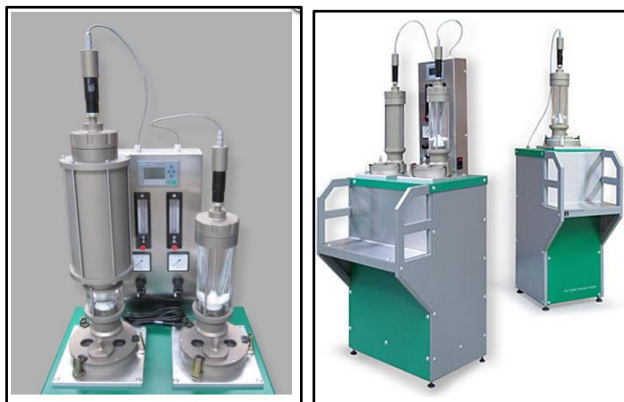


Fuente: <http://www.directindustry.com/prod/precia-molen/gravimetric-dispensers-powder-7658-605568.html>

### 1.8.3 Flame Spray Technologies

Este sistema es utilizado en la proyección térmica, pueden llegar a integrarse con sistemas de láser o soldadura. El sistema de alimentación está basado en el principio volumétrico, proporcionando una alimentación continua con velocidades de suministro de polvo de manera precisa, con controladores de flujo de masa para establecer las características de los gases portadores. Las tolvas que contienen el polvo están diseñadas para soportar altas presiones de gas, pueden o no tener dispositivos de calentamiento<sup>16</sup>. En la figura 1-15 se muestra el equipo descrito.

Figura. 1-75 FTS 10/MC Powder Feeder



Fuente: <http://www.fst.nl/products/systems/powders-feeders/fst-10-20>

<sup>16</sup> Isue, A. Double or Single Powder Feeder type FTS-10 or FTS-20. [Online] 2010  
<http://www.fst.nl/products/systems/powders-feeders/fst-10-20>

#### 1.8.4 Automated Enzyme Screening System

En investigación farmacéutica es fundamental el uso de distintos polvos para la fabricación de medicamentos, de acuerdo al tipo de fármaco se utiliza cierta cantidad de polvo, por lo que se almacenan en diversos compartimentos que hacen parte de una línea de distribución para la fabricación de compuestos. Los polvos se diferencian por los parámetros de dosificación, el Laboratory Automate Technologies Inc. utiliza el dosificador mostrado en la figura 1-16, que permite cumplir con estos requisitos, contando con diez redes de comunicación de datos en el sistema, cinco ejes de servo control de movimiento y reguladores de presión digital además de aislamiento de vibraciones para la precisión de pesaje de polvos, por lo que se convierte en una herramienta para apoyar los esfuerzos de desarrollo de productos químicos.

Figura. 1-8 Automated Enzyme Screening System



Fuente: [http://www.labautomate.net/Enzime\\_screening.html](http://www.labautomate.net/Enzime_screening.html)

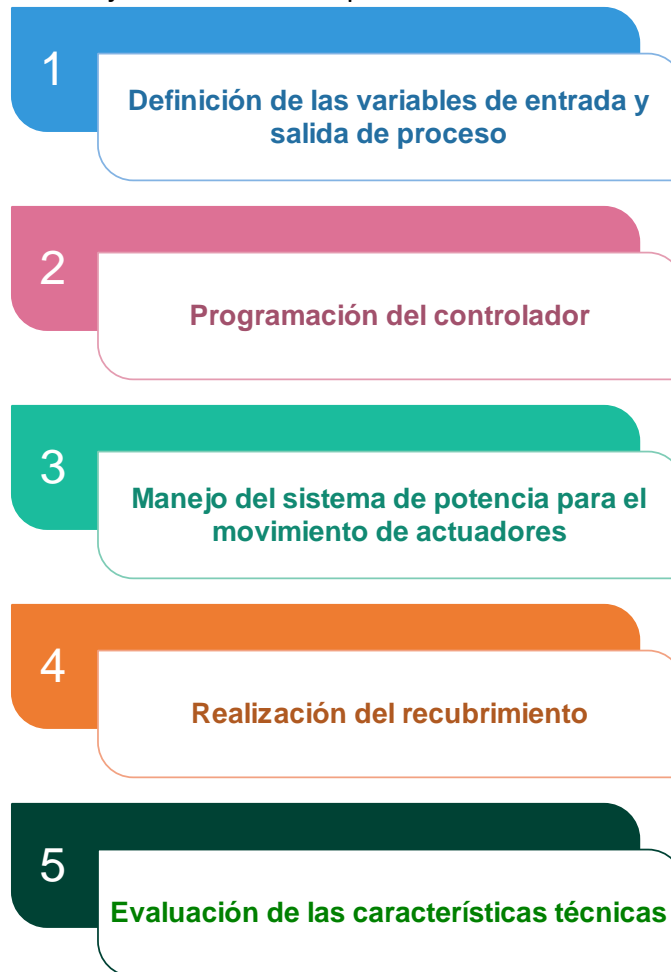
#### 1.9 INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA

El uso de una interfaz hombre-máquina permite la comunicación entre un programa especializado y un mecanismo que interpreta datos introducidos inicialmente en función de controles de respuesta a la activación de sensores y los requerimientos de operación de los actuadores.

Para la operación del equipo de recubrimiento implementado es esencial contar con una interfaz hombre-máquina, que en este caso es desarrollada en el programa Labview 2010. El desarrollo de esta interfaz sigue las etapas mostradas en la figura 1-17, se parte de la definición de variables que intervienen en el proceso y la relación entre las mismas de acuerdo con los algoritmos de control establecidos para la operación del equipo y la

aplicación del recubrimiento, hasta la presentación de una pantalla amigable que facilita la comunicación con el usuario, que permite definir el recubrimiento especificado; estos datos, accedidos a través de un puerto USB y ejecutados por una tarjeta de control Arduino Mega y mediante amplificadores de potencia se canalizan la energía a los actuadores del sistema, para el control del movimiento en los ejes horizontal, vertical y giro; la antorcha que realiza el recubrimiento actúa de acuerdo a las características iniciales, realizando el recubrimiento deseado.

Figura. 1-9 Diagrama de flujo de información para control del sistema



Fuente: Los autores



## 1.10 MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DEL MOVIMIENTO

### 1.10.1 Tornillo de bolas

Este conjunto permite convertir el movimiento giratorio en lineal, las fuerzas que se transmiten se distribuyen entre los rodamientos de bolas que hacen parte él, la disposición del mecanismo permite que las esferas recirculen continuamente entrando y saliendo de zona de carga en caminos definidos; con un alto nivel de precisión en los componentes, el sentido y magnitud del desplazamiento lineal de la tuerca está estrechamente ligado con el sentido y velocidad de giro del actuador.

La capacidad de este tornillo de transportar la carga es considerablemente mayor que un tornillo de potencia de tamaño equivalente pues está diseñado para soportar fuertes cargas de empuje bidireccional, en la figura 1-18 se observa la composición interna del conjunto, con las características descritas.

Figura. 1-1810 Tornillo de bolas



Fuente: [www.directindustry.es](http://www.directindustry.es)

Es un actuador lineal que transmite una fuerza o movimiento con fricción mínima, la ranura tiene un ángulo de hélice que se ajusta con el ángulo de la hélice de la tuerca y de las bolas<sup>17</sup>.

<sup>17</sup> CHANGOLUISA, C.E. y HERRERA, X.V. Diseño y Construcción de un Prototipo de Torno Automático Mediante Control Numérico Computarizado CNC, Proyecto de grado para la optar al Título de Ingeniero Electromecánico. 2007. Escuela Superior Politécnica Del Ejército Sede-Latacunga.

### 1.10.2 Guías lineales

Las guías lineales permiten el desplazamiento de una estructura a lo largo de una trayectoria recta, existen guías tipo riel cuyo desplazamiento se realiza por medio de un patín, dispuestos de tal manera, que ruedan recirculando en una u otra dirección dependiendo del sentido de movimiento, y aquellas que se acoplan por medio de mecanismos de sujeción que facilitan el desplazamiento y precisión en los movimientos realizados ya sean longitudinal o transversalmente. En la figura 1-19 se muestra las guías lineales de una maquina CNC.

Figura. 1-1911 Guías lineales

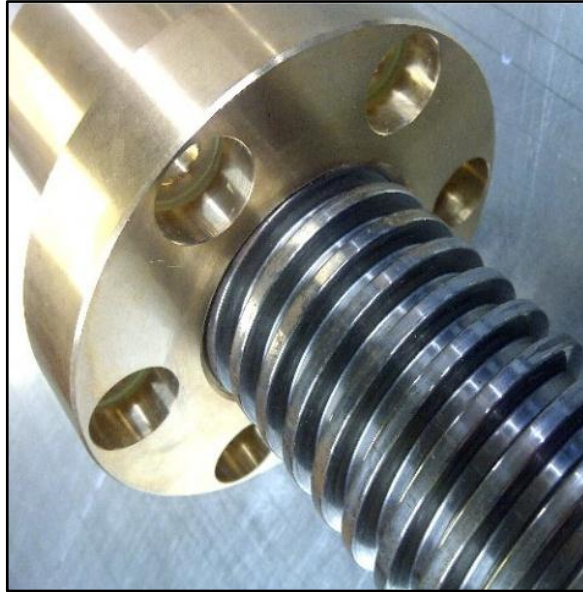


Fuente: [http://mla-s2-p.mlstatic.com/guias-lineales-sbr-20-uu-rieles-desplazamientos-maquina-cnc-4148-MLA2705550889\\_052012-F.jpg](http://mla-s2-p.mlstatic.com/guias-lineales-sbr-20-uu-rieles-desplazamientos-maquina-cnc-4148-MLA2705550889_052012-F.jpg)

### 1.10.3 TORNILLO DE POTENCIA

Este sistema está compuesto de un tornillo y una tuerca de husillo que lo acompaña, con una buena capacidad de transporte de carga, y un movimiento lineal preciso, tienen una fricción relativamente alta en comparación con la fricción estática y partes mecánicas que se acoplan con las superficies de desplazamiento, el conjunto que se muestra en la figura 1-20, también es conocido como tornillo de avance-husillo.

Figura. 1-2012 Tornillo de potencia



Fuente: <http://image.made-in-china.com/2f0j00cKETFegqZQom/316-Stainless-Lead-Screw-Threaded-Rod-With-Brass-Nut.jpg>

## 2. DISEÑO MECÁNICO DEL EQUIPO DE RECUBRIMIENTO POR SPRAY TÉRMICO

### 2.1 GENERALIDADES

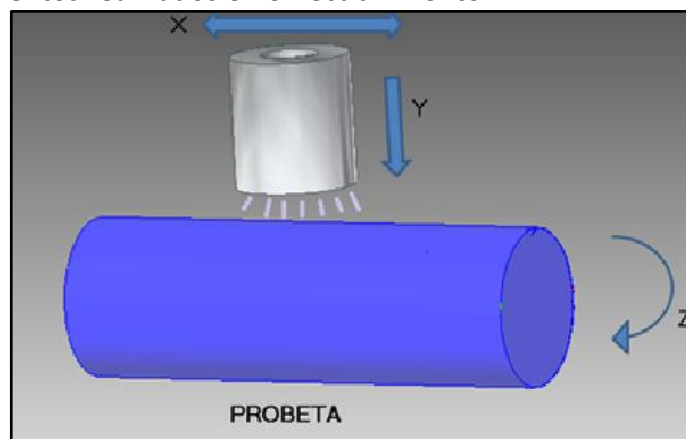
De acuerdo a las necesidades y restricciones impuestas por el laboratorio del Instituto de ciencia y tecnología de los materiales-INCITEMA de la Uptc, se busca realizar el diseño de un equipo de proyección térmica usando polvo que obedece a la necesidad de la aplicación de recubrimiento por oxiacetileno y utiliza polvos base como óxido de aluminio, óxido de zirconio, con el fin de atender a consideraciones de calidad de la deposición en términos de espesor, rugosidad, adherencia, uniformidad, del elemento a tratar; con base en estas características es preciso plantear un conjunto que permita satisfacer las propiedades del recubrimiento, teniendo en cuenta posicionamiento, impermeabilidad etc.

De acuerdo a los requerimientos establecidos para el funcionamiento del equipo de recubrimiento por spray térmico, fue necesario establecer un sistema de referencia que permitieron la descripción de su movimiento.

En el espacio tridimensional existen varios sistemas de coordenadas para este propósito entre los que se encuentra el sistema de coordenadas cilíndricas, sistema de coordenadas esféricas y el más aplicado el sistema de coordenadas cartesianas.

El diseño toma como base el uso de un sistema referencial cartesiano tridimensional. Esto se define teniendo en cuenta que el movimiento de la antorcha que realiza el trabajo, se encuentra en el plano X, Y, el giro de la probeta a la que se realiza el recubrimiento obedece al movimiento en Z, como se muestra en la figura 2-1.

Figura. 2-1 Movimientos realizados en el recubrimiento



Fuente: los autores

De acuerdo con esto el equipo de recubrimiento diseñado e implementado tiene en cuenta las variables y elementos de posicionamiento, precisando las propiedades del polvo base a utilizar y sus características de aplicación, con el fin de determinar las restricciones y los criterios de operación del equipo.

## 2.2 CRITERIOS DE DISEÑO

El diseño propuesto tiene en cuenta las recomendaciones de Tien-Chien Chang, et al<sup>18</sup>, según la cual uno de los objetivos de diseño de un producto tiene que ver con que este sea fácil y económicamente manufacturado, es necesario establecer una serie de reglas como un conjunto multifuncional, con características como:

- Minimización del número de partes: así como evitar el uso de piezas separadas.
- Diseño para fácil fabricación: se deben elegir tolerancias apropiadas y utilizar componentes estándar para que sea posible un reajuste de piezas en el momento que se requiera.
- Selección de materiales: parte de esta selección debe considerar una estabilidad dimensional en la que se tenga en cuenta propiedades mecánicas y físicas, factores geométricos y de producción, que garanticen un funcionamiento completo, así como procesos de manufactura óptimos.
- Establecer una ruta de ensamble de las piezas.
- Desarrollo de un sistema modular

Parte de las restricciones impuestas para la construcción del equipo se hace teniendo en cuenta el uso en laboratorio, que para este caso específico la superficie de trabajo corresponde a una longitud máxima para realizar el recubrimiento de 50 cm y un diámetro máximo de probeta igual a 50 cm.

El procedimiento de aplicación tiene en cuenta tres tipos de movimientos, uno vertical que define la distancia entre la boquilla de proyección y el sustrato, un movimiento longitudinal que permite cubrir la extensión del recubrimiento y un movimiento de giro para completar la aplicación del recubrimiento.

Cada una de las partes utilizadas en el ensamble deben tener características adecuadas de peso, longitud, para un equilibrio proporcional en el sistema; también se establecen los principios de funcionamiento de los sensores, actuadores, sistemas y estrategias de control a utilizar, para ello se realiza un análisis de las diferentes alternativas para una calidad final del producto.

---

<sup>18</sup> CHANG, T., WYSK, A., y WANG, H. Computer-Aided Manufacturing. New Jersey: Second Edition, Prentice Hall. 1998.

La implementación del equipo requiere rigidez y estabilidad por lo que se elige lámina de acero inoxidable calibre 18 para la carcasa, madera para aislar los compartimentos que separan el sistema electrónico y el de giro, permitiendo el respectivo espacio de trabajo en medio de ellos y lámina de calibre 20 y 22 para elementos puntuales.

Para el diseño del equipo se tuvo en cuenta las características de cada elemento utilizado para que no haya una sobredimensión en los mismos, tal como material, volumen etc; lo que facilita la realización eficiente del proceso de recubrimiento, el peso a la hora de la construcción no se encuentra limitado, pero se busca que el desplazamiento de la misma se pueda hacer de manera rápida y segura.

El acceso al compartimento de trabajo facilita su operación de manera segura y rápida, se hizo el diseño estructural pensando en que la manipulación y mantenimiento del equipo pudiera ser realizada por un usuario de estatura promedio permitiendo el montaje, desmontaje y sujeción de los elementos requeridos en el recubrimiento, de forma eficiente y práctica.

El diseño del sistema mecánico se realizó a partir de un esquema conceptual dónde se analizan las diferentes alternativas que dan respuesta a las características de trabajo requeridas. Se evaluaron sistemas verticales, horizontales, y diferentes tecnologías de actuación que van desde los sistemas robóticos hasta maquinas convencionales, definiendo finalmente un sistema de posicionamiento cartesiano tridimensional.

De acuerdo a la necesidad de desplazamiento del sistema horizontal y vertical en los ejes mencionados, fue necesario establecer un sistema de posicionamiento lineal que permita mover automáticamente la antorcha que realiza el recubrimiento sobre una trayectoria recta hacia un punto de referencia establecido y su desplazamiento dentro del área de trabajo, cumpliendo con características de desempeño necesarias para cumplir con los niveles de calidad del recubrimiento.

La aplicación del recubrimiento por spray térmico requirió de una antorcha de proyección térmica, que de manera uniforme aplique por capas un recubrimiento con especificaciones de calidad que relacionan el espesor, la rugosidad la porosidad y la adherencia deseadas. Se buscó un movimiento de giro que diera respuesta a la profundidad. De acuerdo con las restricciones impuestas para el diseño del equipo se dimensionó un mecanismo que toma como base los siguientes principios de funcionamiento:

- El área de trabajo de 50x50cm se ubica sobre un plano vertical sobre el que se ubica un sistema de referencia bidimensional  $(X, Y)$ .
- La antorcha de proyección se ubica sobre un soporte que se desplaza en la dirección  $X$  por medio de un mecanismo que permita alcanzar los 50 cm definidos.

- El mecanismo de movimiento horizontal que se ubica sobre una plataforma vertical, la cual se desplaza en esta dirección en el rango de movimiento definido.
- La profundidad es simulada a partir del giro se un sistema que se mueve alrededor del eje Z.

Además fue necesario implementar un sistema de dosificación que suministre la cantidad de polvo de recubrimiento en proporción tal que, en concordancia con el sistema de posicionamiento aplique el recubrimiento con los parámetros de calidad deseados.

En las siguientes secciones se muestra el diseño de los mecanismos definidos para el cumplimiento a las especificaciones anteriormente mencionadas.

## **2.3 MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DEL MOVIMIENTO**

### **2.3.1 Movimiento en el eje Y**

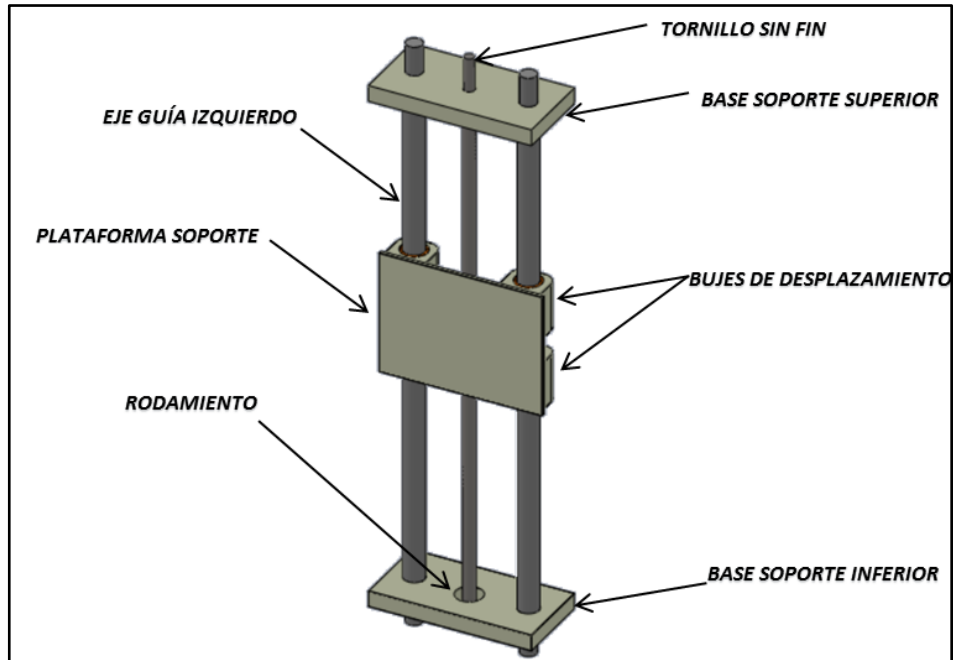
Una de las especificaciones de operación del equipo refirió a la distancia entre la boquilla de proyección de partículas y el sustrato o superficie a recubrir, esta distancia es variable en función del tipo de recubrimiento la dispersión de las partículas y la temperatura de deposición; además, las probetas a recubrir pueden variar en diámetro en un rango que va desde 0 a 500 mm, por estas razones y de acuerdo con la configuración establecida, la antorcha debe poseer un movimiento vertical calculado en 650 mm.

Se tuvo en cuenta que la distancia entre la boquilla de proyección y el sustrato no varía durante la aplicación del recubrimiento, este movimiento se convierte en parte del posicionamiento del sistema para el inicio de la aplicación del recubrimiento, por lo que el movimiento puede hacerse a una velocidad constante y limitada por las características definidas para la operación del actuador.

De acuerdo al diámetro de la probeta a recubrir y la altura de la boquilla de la antorcha que hace el recubrimiento; para el posicionamiento se estableció una relación entre el paso del tornillo y los parámetros mencionados generando una longitud de traslado.

Es así que para suplir esta necesidad de movimiento, se diseñó un sistema compuesto por un tornillo de potencia y dos guías lineales que permiten el posicionamiento requerido en cada punto de anclaje vertical una vez que el actuador cumple su trabajo. El tornillo de potencia también tiene la función de soportar el sistema de movimiento horizontal gracias a la plataforma soporte diseñado para fijar el sistema mecánico que pertenece al eje Y, como se muestra en la figura 2-2.

Figura. 2-2 Componentes del sistema vertical

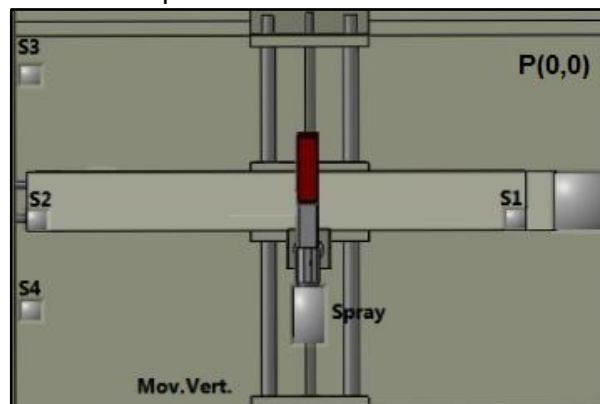


Fuente: los autores

En la figura anterior se visualiza el sistema de movimiento vertical con el tornillo de potencia o tornillo sin fin, los ejes guía, los bujes la plataforma soporte y los rodamientos. Se integra una tuerca adherida a la plataforma que en una junta con el tornillo permiten el desplazamiento.

Los modelamientos matemáticos para el posicionamiento vertical tienen en cuenta que toda aplicación del recubrimiento parte de una posición de referencia definida para el equipo como posición (0,0) ubicada en la parte posterior derecha del plano de trabajo vertical, como se observa en la figura 2-3.

Figura. 2-3 Posición de referencia para el sistema vertical.



Fuente: los autores



A partir de la posición de referencia se establece en primera instancia la distancia de movimiento vertical para alcanzar la posición de trabajo, la cual está en función de la altura total d trabajo, el diámetro de la probeta y la distancia entre la boquilla y el sustrato, de acuerdo con la siguiente relación

$$Y_t = H - \left(\frac{D}{2} + H_t\right) \quad (2-1)$$

Dónde:

$Y_t$ = Longitud a mover

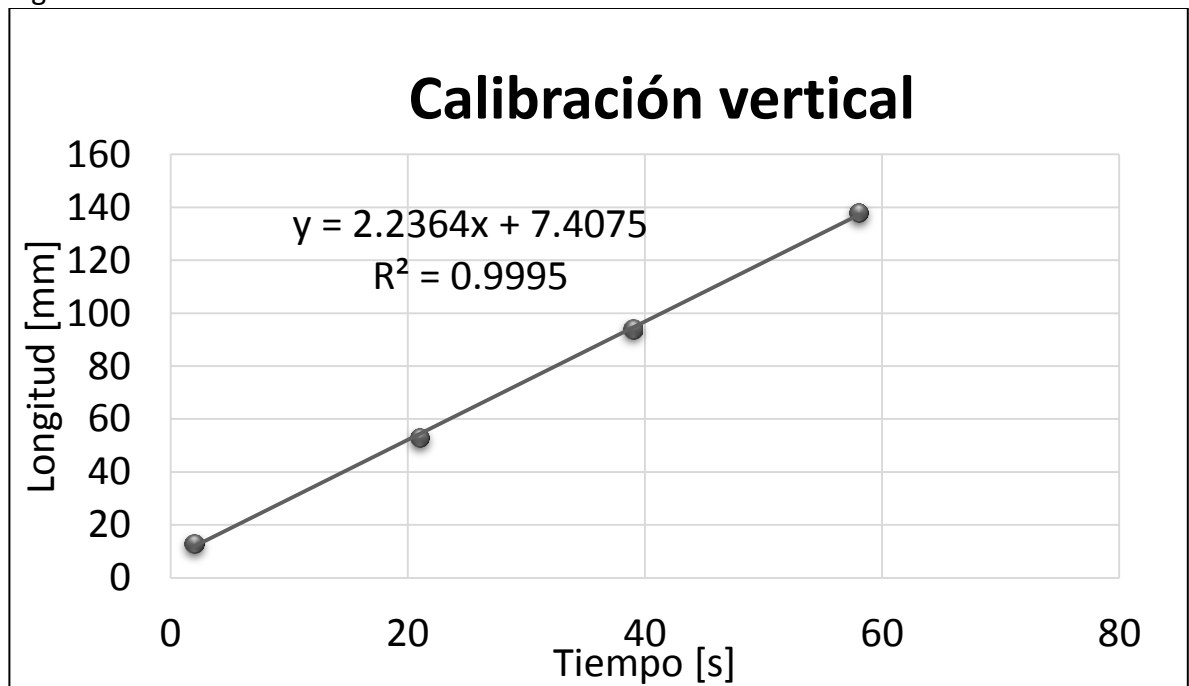
H = Altura total máxima de desplazamiento

D = Diámetro de la probeta

$H_t$  = Altura de la boquilla

Para garantizar la integridad del equipo evitando colisiones, se dispone de un una alternativa redundante que involucra el tiempo aproximado de movimiento, el cual ha sido definido experimentalmente de acuerdo con la curva de calibración mostrada en la figura 2-4.

Figura. 2-4 Curva de calibración vertical



Fuente: los autores

De acuerdo con la curva anterior la relación entre el la distancia a mover y el tiempo se relacionan por el siguiente modelo matemático:

$$t = \left( \frac{T \times Y_t}{H_t} \right) \quad (2-2)$$

Dónde:

t= Tiempo que tarda en recorrer la altura especificada

T = Tiempo de demora en bajar el sistema mecánico del eje vertical

Para el modelo de diseñe en el eje Y se tiene en cuenta los resultados experimentales respecto al posicionamiento de la antorcha, el rango de desplazamiento, la ubicación de los rodamientos, y el prototipo de acuerdo a la caracterización inicial.

Las bases de soporte superior e inferior hacen la alineación de los ejes guía y le dan rigidez al sistema, está diseñado y fabricado con tolerancias para ensamble de precisión, como se muestra en el anexo A. Los ejes guía son ejes calibrados con revestimiento con cromo cuentan con una dureza y homogeneidad en la capa exterior que le brindan características optimas de funcionamiento; tienen un diámetro de 25mm, calculados para soportar el peso del sistema de movimiento horizontal, que va anclado sobre la plataforma soporte; el tronillo sin fin es un dispositivo de 5/8" con un paso de 2,5mm, en acero aleado 4340 seleccionado para soportar la carga impuesta por la plataforma soporte y el sistema de movimiento horizontal.

El cálculo para la selección de los anteriores componentes se presenta se hace con base en una rampa de aceleración en la que el motor vence la inercia con el siguiente análisis:

Para establece el torque máximo permisible en el desplazamiento del eje vertical se utiliza la fórmula:

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{F}{v} \quad (2-3)$$

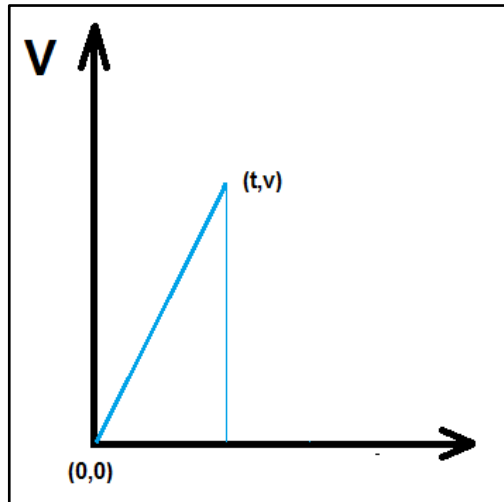
Dónde:

F= fuerza del motor determinada por la corriente y la tensión del motor

V= velocidad del motor

En la figura 2-5 se muestra la rampa de aceleración inicial del motor para la realización de los cálculos respectivos.

Figura. 2-5 Aceleración inicial



Fuente: los autores

Determinando la aceleración a partir de la velocidad definida, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \quad (2-4)$$

$$m = \frac{v - 0}{t - 0} \quad (2-5)$$

$$Y - Y_1 = m(X - X_1) \quad (2-6)$$

$$Y - v = \frac{v}{t}(X - t) \quad (2-7)$$

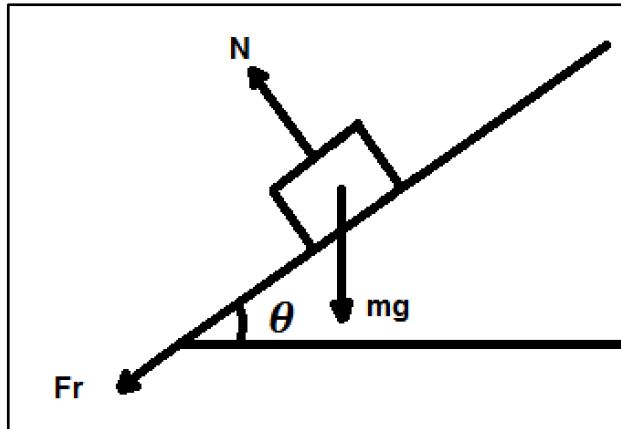
$$Y = \frac{v}{t}X \quad (2-8)$$

Determinando la aceleración se tiene:

$$a_{(t)} = \frac{dv(t)}{dt} \quad (2-9)$$

Es necesario establecer la fuerza para mover la carga, por tanto se hace un análisis de esfuerzos sobre el tornillo utilizado, en la figura 2-6 se visualiza el diagrama de cuerpo libre para el tornillo.

Figura. 2-6 Análisis de fuerzas en el tornillo



Fuente: los autores

$$F = m(a + g\sin\theta + \mu_k g\cos\theta) \quad (2-10)$$

Para determinar el torque se realiza utilizando la fuerza y el radio previstos para el desplazamiento del sistema por medio de la ecuación:

$$T = F \times R \quad (2-11)$$

### 2.3.2 Movimiento en el eje X

Las restricciones impuestas para el equipo demandaron que la antorcha de deposición tuviera un movimiento horizontal que cubra 500mm, sin embargo el diseño contempla un margen de seguridad de movimiento permitiendo un desplazamiento de 825mm, para permitir una zona segura de inicio de ignición o encendido de la antorcha.

El movimiento horizontal exige, según especificaciones técnicas de la deposición de partículas, que la boquilla se mueva en un rango de velocidades entre 0 y 8mm/s para permitir un movimiento relativo entre la boquilla y el sustrato variable en función del espesor de capa de recubrimiento requerido y las especificaciones técnicas del recubrimiento.

Para dar respuesta a esta necesidad se diseñó e implementó un sistema de precisión, posición definido por un tornillo y tuerca de bolas recirculantes, que permite un movimiento suave en todo el recorrido.

El movimiento para la aplicación del recubrimiento se hizo con un control de velocidad riguroso, ya que este movimiento concreta las características de espesor, rugosidad y adherencia del recubrimiento al sustrato, por esta razón este movimiento se genera por un motor paso a paso para garantizar las condiciones de velocidad como el desplazamiento de la boquilla.

En función del número de pasos por vuelta y el paso del tornillo; se estableció el desplazamiento de la antorcha articulada en el sistema.

Para definir el movimiento del sistema horizontal se tuvo en cuenta las características de cada uno de los componentes utilizados como el paso del tornillo, el número de pasos del motor y la velocidad deseada.

A partir de las anteriores consideraciones se definieron los modelos matemáticos que responden por la síntesis del mecanismo a utilizar. Es así que el cambio de posición se rige por el modelo matemático

$$\Delta L = \frac{K \times P_t}{N} \quad (2-12)$$

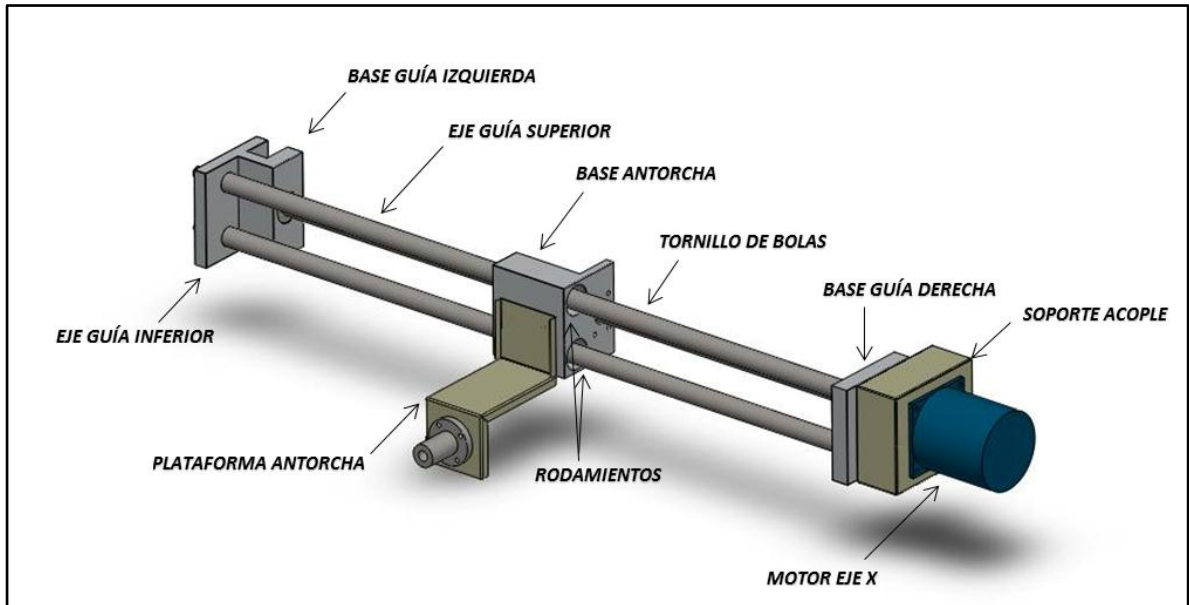
Donde  $\Delta L$  es el cambio de posición,  $N$  es el número de pasos por vuelta del motor,  $K$  número de pasos a mover y  $P_t$  el paso del tornillo.

Como la longitud a mover es uno de los parámetros de entrada, se determina el número de pasos del motor a ser proporcionados por el sistema de control, por tanto la ecuación que definen el número de pasos a mover de acuerdo al tipo de movimiento es:

$$K = \frac{\Delta L \times N}{P_t} \quad (2-13)$$

Las bases guía derecha e izquierda mostradas en la figura 2-7 fueron diseñadas para que los rodamientos ubicados para el desplazamiento de las guías y el tornillo, pudieran acoplarse a la base con una precisión tal, que no exista ningún tipo de desajuste en el movimiento de la antorcha encargada del recubrimiento, estas características de ajuste se presentan en los planos correspondientes.

Figura. 2-7 Componentes del sistema horizontal



Fuente: los autores

El sistema cuenta al mecanismo de tornillo de bolas, que le brinda un posicionamiento preciso, además de un movimiento suave y control en todo el recorrido, lo que es de vital importancia pues la eficiencia del conjunto requiere gran estabilidad y exactitud.

En la caracterización para el movimiento del eje Y se establece un motor de corriente continua de 1500 rpm, éste es el encargado de generar el desplazamiento sobre el eje vertical.

### 2.3.2.1 Cálculo del actuador

El uso de un motor paso a paso y un tornillo de bolas recirculantes constituyen el actuador encargado del control del movimiento en el eje horizontal. La duración del actuador está determinada por la vida útil del husillo y por la carga neta para un ciclo. Las cargas C en un ciclo se calculan para una carga media de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Cm = \sqrt[3]{\frac{C1^3 \times S1 + C2^3 \times S2 + \dots}{S1 + S2 + \dots}} \quad (2-14)$$

$$C1 = \frac{W}{\mu} \quad (2-15)$$

Dónde:

Cm = Carga media

C1,C2 = Carga constante en N, durante S1,S2

S= Curso útil en mm

W = Peso de los componentes del eje X

Para el cálculo de la duración de vida de un tornillo de bolas en ciclos completos, ida y vuelta se determinó por el paso del mismo, el curso útil, la carga dinámica y la carga media:

$$Lc = \frac{500.000 \times P}{S} \times \left( \frac{C}{Cm} \right)^3 \quad (2-16)$$

Dónde:

Lc = Duración de vida en ciclos completos (ida y vuelta).

P = Paso del tornillo en mm

S= Curso útil en mm

C= Carga dinámica en base del husillo en N

Cm= Carga media constante en N

El par necesario para desplazar la carga que se le aplique se define como la fuerza por la distancia que tiene que vencer el husillo, a partir de la siguiente relación:

$$Par = \frac{P \times paso}{2.000 \times \pi \times C} \quad (2-17)$$

Dónde:

Paso = Paso del tornillo en mm

Par = Fuerza por distancia en Nm

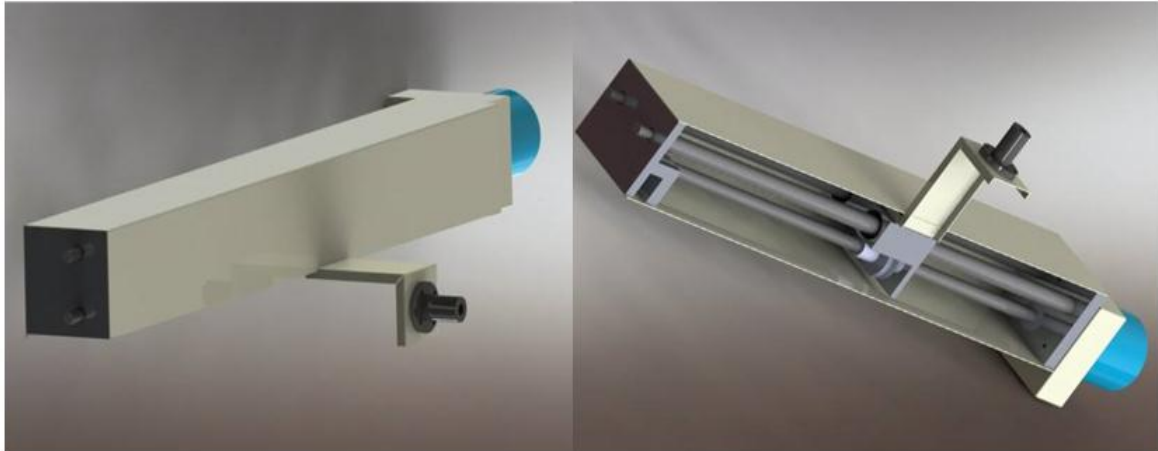
P= Peso en N de la antorcha y su soporte correspondiente

C= Constante 0,8 para tornillo de bolas

En la figura 2-8 se muestra el sistema horizontal simulado, en él se aprecia el ensamble conjunto con las tapas de sujeción, soporte y los elementos empleados. La longitud de

trabajo es suficiente para que el desplazamiento de la antorcha en el momento que esté realizando el recubrimiento incluya la longitud de la probeta prevista más grande a tratar.

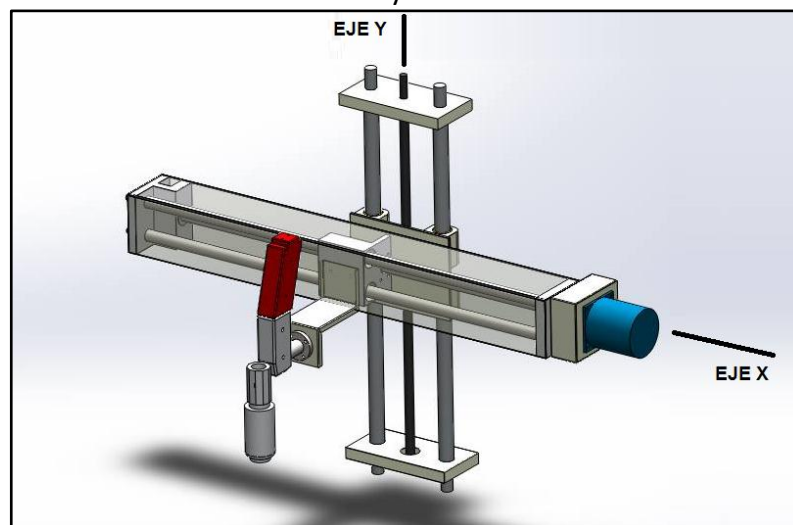
Figura. 2-8 Vista de conjunto del sistema horizontal: a la izquierda en posición de trabajo y a la derecha el detalle interno



Fuente: los autores

La integración de los sistemas horizontal y vertical se muestran en la figura 2-9 los movimientos son independientes, pero a su vez, el ensamble le brinda rigidez y estabilidad a cada uno de los sistemas que hacen parte de él, permitiendo la precisión requerida en los desplazamientos; en la articulación de los sistemas se estableció el peso aproximado del eje horizontal y el eje vertical con esto se precisó la carga total a la que estaría sometido el sistema de posicionamiento vertical.

Figura. 2-9 Ensamble del sistema horizontal y vertical



Fuente: los autores

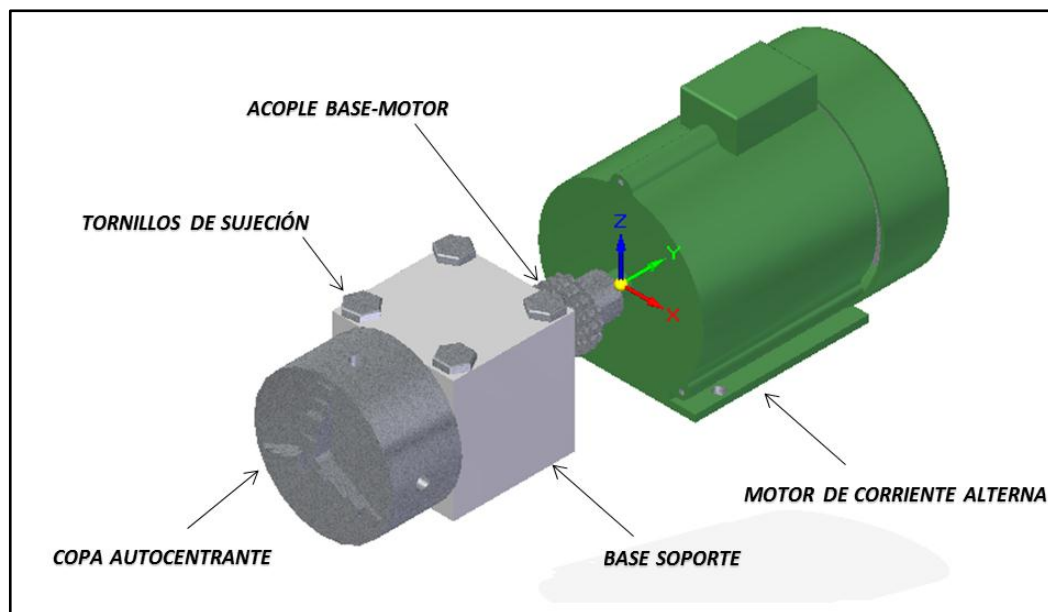


### 2.3.3 Movimiento en el eje Z

El sistema de giro definido para el movimiento en el eje Z se muestra en la figura 2-10, y esquematiza los elementos que hacen parte del sistema de rotación que se emplea para fijar las probetas a recubrir; para el control de velocidad del motor encargado de éste sistema se empleó un variador de velocidad que permite establecer varios niveles de giro, que de forma similar a lo planteado para el movimiento en el eje X establece la velocidad relativa entre la boquilla y el sustrato, de acuerdo al tipo de recubrimiento.

El acople que transmite el movimiento desde el eje del motor es de tipo piñón-cadena y transfiere el movimiento a una copa autocentrante a través de un eje de unión; la razón por la que se elige el acople, es porque facilita el montaje ya que permite desalineaciones angulares y paralelas. El sistema cuenta con una base cuadrangular que se ajusta al eje a través de rodamientos cónicos que le dan estabilidad al sistema, esta base se fija con pernos de sujeción para evitar algún tipo de movimiento causado por el funcionamiento del motor.

Figura. 2-10 Componentes del sistema de giro



Fuente: los autores

Las condiciones de operación del equipo requieren velocidades de rotación que varíen entre 50rpm y 500rpm de acuerdo al recubrimiento a fijar. Los planos detallados del sistema de giro se muestran en el anexo A.

## 2.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

Para la dosificación empleada en el equipo de recubrimiento por proyección térmica se utilizó el fenómeno de arrastre de polvo, el cual a partir de la energía cinética de un gas inerte proporciona el polvo en la cantidad en el tiempo requerido. De acuerdo a la granulometría del polvo se tienen en cuenta características como: tamaño, distribución, forma y porosidad; estas permiten determinar las condiciones del flujo que se genera.

Debido a las características del material que se va a manipular, el sistema de dosificación debe cumplir con los siguientes requerimientos de distribución:

- La capacidad del depósito debe permitir almacenar una cantidad de polvo preestablecido para la aplicación del recubrimiento.
- El sistema debe ser hermético, para que la cantidad de polvo de entrada sea la misma de salida.
- No deben generarse acumulaciones de polvo en la evacuación del mismo.
- La cantidad de polvo que cae desde el sistema de depósito al plato dosificador debe ser uniforme.

El sistema diseñado tuvo como referente un modelo alemán de la empresa Flame Spray Technologies<sup>19</sup>, que consta de un depósito y un sistema de dosificación de polvo; un conducto que lo direcciona y un flujo de gas encargado de desplazarlo, el sistema de almacenamiento debe contener un volumen de 960 cm<sup>3</sup> y debe dosificar de acuerdo con las especificaciones técnicas del laboratorio y el tipo de polvo a usar.

### 2.4.1 Sistema de depósito

El depósito es un cilindro con forma cónica en su parte inferior, y una tapa para carga y agitación. Tiene una entrada vertical que permite el equilibrio de presión con el dosificador para garantizar el movimiento de las partículas, además cuenta con un sistema de anclaje para su estabilidad.

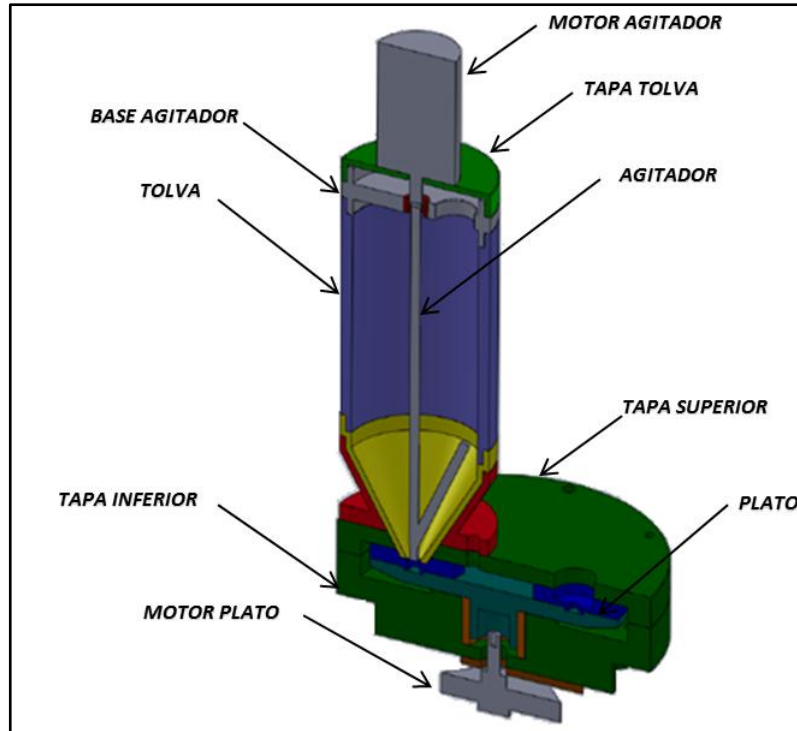
La tapa superior que se acopla al sistema de depósito tiene una superficie roscada en la parte baja, que se ensambla a la tolva y permite el contacto con la superficie interna y el respectivo mantenimiento de la misma; tiene un orificio exterior donde ingresa el polvo y es hermetizado por medio de un tapón cónico. Cuenta además con un orificio lateral que permite el paso de aire al interior del elemento, permitiendo una conexión rápida y eficaz entre la tolva y el cilindro de gas inerte.

---

<sup>19</sup> Isue, A. Double or Single Powder Feeder type FTS-10 or FTS-20. [Online] 2010 <http://www.fst.nl/products/systems/powders-feeders/fst-10-20>

Para que el desplazamiento de polvo sea continuo, se diseñó un agitador con longitud suficiente para trasladar el material de aporte, evitando posibles masas o acumulaciones. En la figura 2-11 se observa la vista en corte del ensamble del sistema de dosificación.

Figura. 2-11 Vista de corte de dosificador

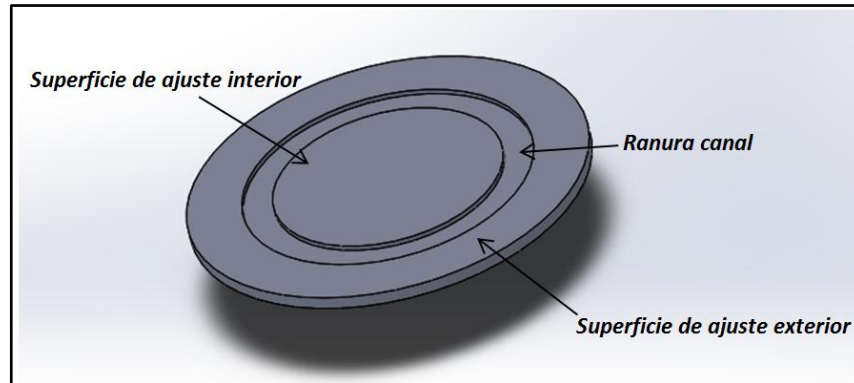


Fuente: los autores

#### 2.4.2 Diseño de plato dosificador

El diseño del plato se realizó en teniendo en cuenta las características del polvo que debía distribuir; permitiendo el desplazamiento del mismo y un caudal específico, además se debe fijar una ranura de 12mm de ancho y 2mm de profundidad, que permite la deposición de polvo y transporte del mismo al orificio de salida por medio de un movimiento rotacional. En la figura 2-12 se muestra el plato dosificador diseñado con un corte angular en la parte externa que disminuye el peso y el área de contacto con la tapa inferior.

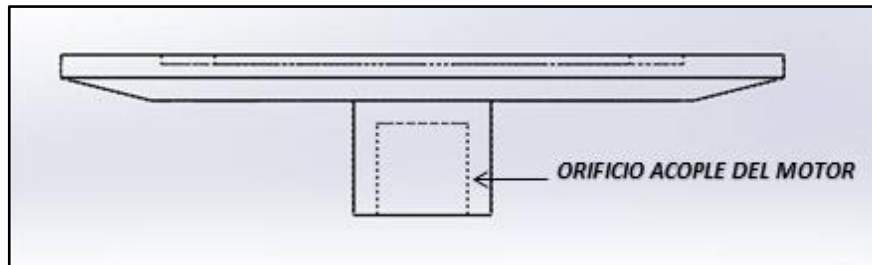
Figura. 2-12 Plato dosificador diseñado, arriba vista superior



Fuente: los autores

El plato dosificador cuenta con un orificio que se observa en la figura 2-13, que se ensambla con la tapa inferior, y a su vez sirve de acople con el motor que genera su movimiento. Las dimensiones del plato se encuentran en los planos se encuentran en el Anexo A.

Figura. 2-13 vista frontal con líneas ocultas.



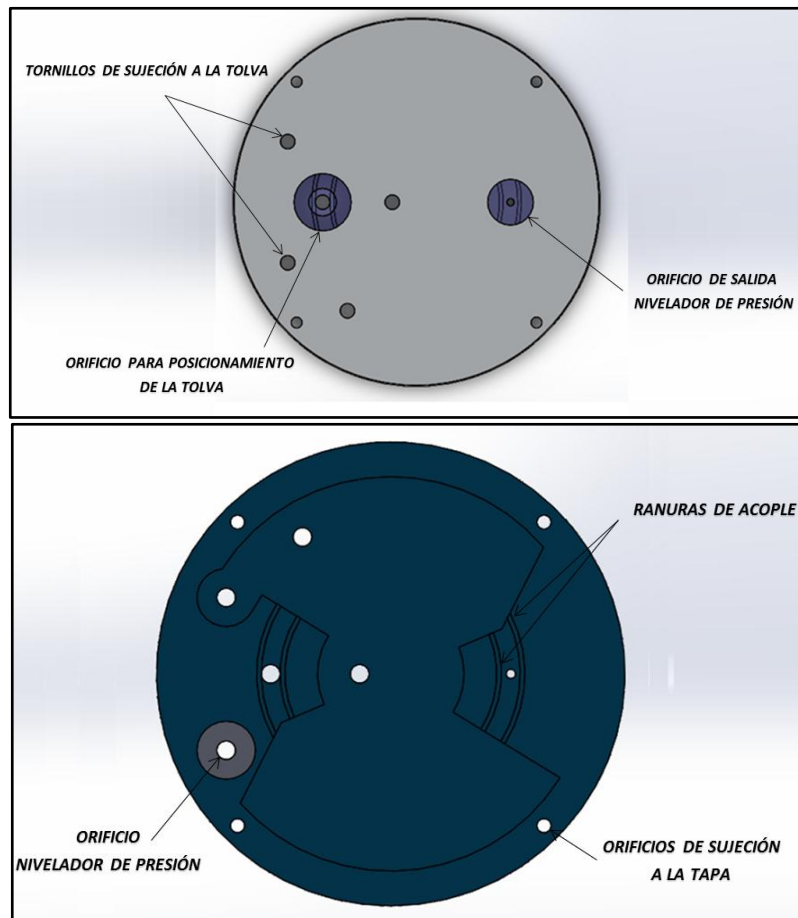
Fuente: los autores

### 2.4.3 Tapa superior

La tapa superior del sistema de dosificación se diseñó con las dimensiones requeridas para su ensamble con la tapa inferior evitando escapes de polvo y gas. Además cuenta con ranuras de acople donde el plato es ubicado, como se observa en la figura 2-14. Los orificios de sujeción permiten el anclaje y rigidez necesaria para la posición de ensamble.

Cuenta con orificios para soportar y acoplar la tolva donde se deposita el polvo, además de un orificio que tiene la función de nivelar la presión que se genera en el interior del mecanismo y uno de expulsión del polvo para su respectivo transporte.

Figura. 2-14 Arriba vista superior de la tapa superior, abajo vista posterior

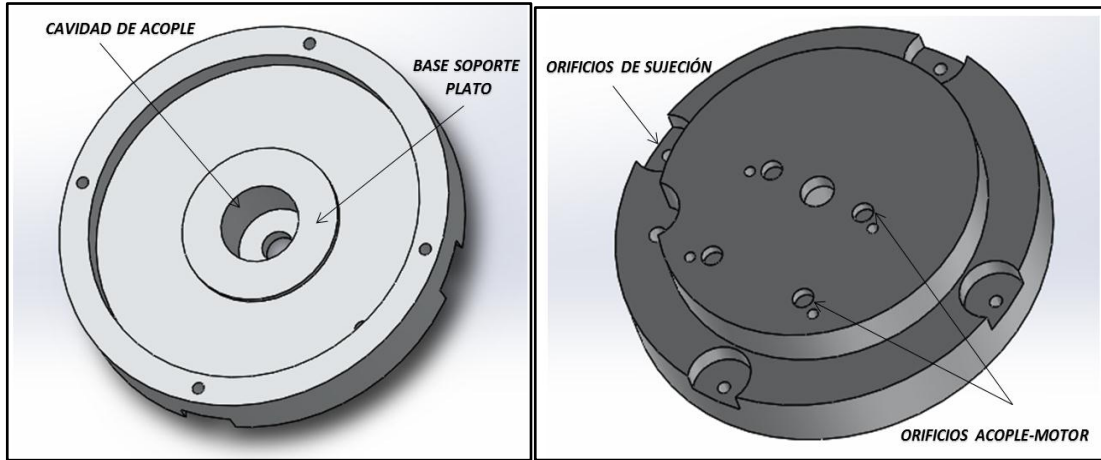


Fuente: los autores

#### 2.4.4 Tapa inferior

La tapa inferior tiene un volumen mayor que la tapa superior debido a características de ensamble, se requirió una geometría especial para su soporte y acople con los demás componentes del sistema de dosificación incluyendo el plato y la tapa superior, cuenta con orificios que permiten el ensamble del motor que controla el plato dosificador descrito en la sección anterior, en la figura 2-15 se señalan las principales características del elemento; las cavidades que posee están diseñadas para el acople de elementos que permiten el movimiento del plato.

Figura. 2-15 Abajo vista posterior de la tapa inferior, arriba vista superior.



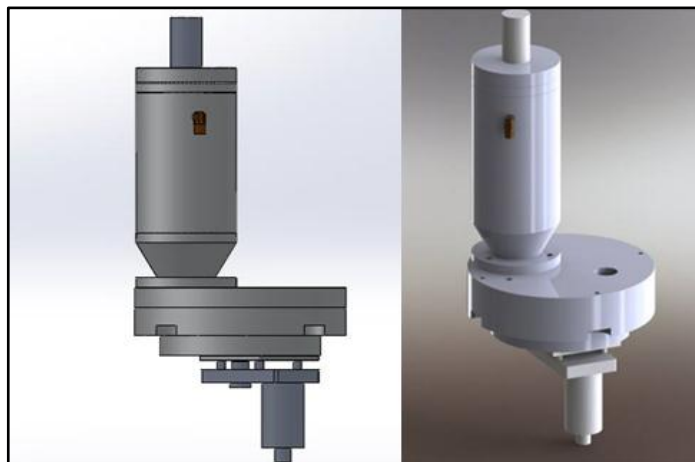
Fuente: los autores

En la simulación del ensamble, se tuvo en cuenta las capacidades y restricciones del proceso, esto permite hacer modificaciones para satisfacer las necesidades establecidas para su funcionamiento en el laboratorio.

#### 2.4.5 Ensamble

En la figura 3-13 se encuentra el diseño del dosificador con todos sus componentes; elaborado en software CAD. El diseño del sistema se realizó en función de una implementación segura y fácil, que puede ser integrada a un soporte que permita la conexión a los equipos de gas necesarios en el proceso de recubrimiento por proyección térmica.

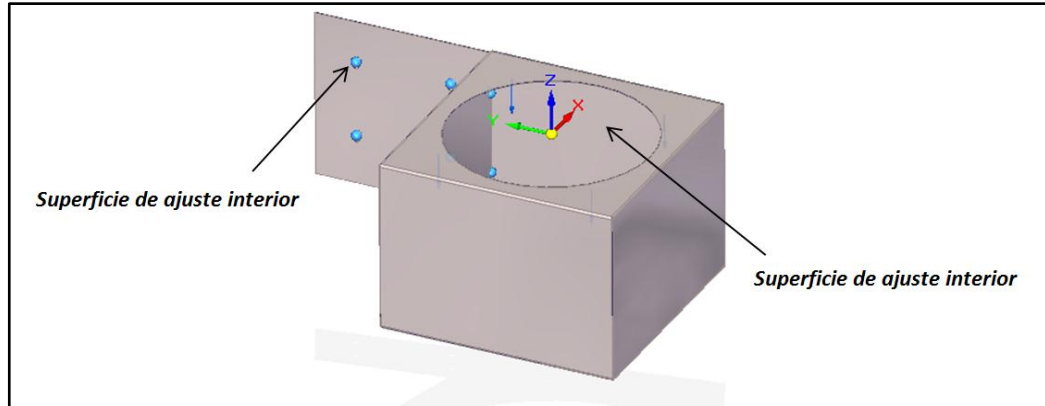
Figura. 2-16 Dosificador diseñado



Fuente: los autores

En la figura 2-17 se muestra el soporte diseñado para la ubicación del dosificador, el diámetro del orificio central permite el acople con la tapa inferior.

Figura. 2-17 Soporte dosificador



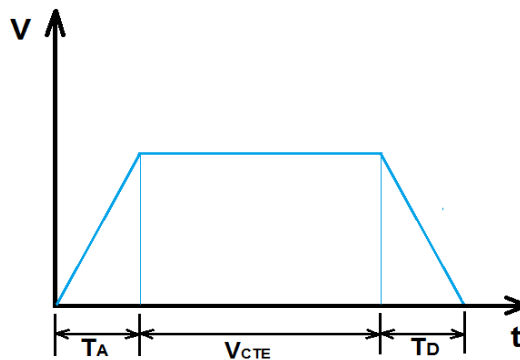
Fuente: los autores

## 2.5 CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS DE MOVIMIENTO EN LOS TRES EJES

### 2.5.1 Sistema horizontal

Tomando como referencia las curvas estándar de un motor paso a paso, se establecieron unas condiciones de tiempo para vencer la inercia del sistema y tomar la velocidad lineal máxima permisible a la que puede viajar sobre el eje. Se estableció el tiempo de aceleración, tiempo de desaceleración y el punto donde la velocidad es constante. En la figura 2-18 se muestra la rampa de movimiento ejecutada por el actuador del sistema horizontal del equipo diseñado.

Figura. 2-18 Rampa de movimiento de los motores



Fuente: los autores

En la sección anterior se definieron las ecuaciones que rigen los movimientos en los ejes diseñados, en relación a esto se hacen los cálculos respectivos para dichos movimientos.

$$K = \frac{\Delta L \times N}{P_t} \quad (2-18)$$

Tomando los valores para:

$$\Delta L = 100 \text{ mm}$$

$$N=400$$

$$P_t=5$$

$$K = \frac{100 \times 400}{5} \quad (2-19)$$

$$K = 8000 \quad (2-20)$$

Es decir, con los parámetros definidos para la ecuación, el motor debe mover 8000 pasos para llegar a la posición requerida.

Para los cálculos del tornillo de bolas se tuvo en cuenta las ecuaciones definidas anteriormente dónde se tienen en cuenta los componentes que debe mover el motor correspondiente al eje X, en donde el componente más pesado es la antorcha con un peso de 1,5Kg y los demás componentes, el peso total es de 2,88Kg . Considerando una fricción de 0,11 de acuerdo a datos del fabricante para este sistema, por medio de la ecuación 3-5 se determina la carga media:

$$C1 = \frac{2,88kg \times 9,81m/s^2}{0,11} = 256,8N \quad (2-21)$$

Teniendo en cuenta la distancia que ocupa la antorcha y la máxima distancia para el eje X se tiene:

$$Cm = \sqrt[3]{\frac{256,8^3 \times 91 + 256,8^3 \times 91}{1470}} = 128N \quad (2-22)$$



Para calcular la duración de vida en ciclos completos del tornillo de bolas ida y vuelta se toma la carga dinámica C1 y Cm calculadas, por medio la ecuación descrita:

$$LC = \frac{500.000 \times 5}{735} \times \left(\frac{256,8}{128}\right)^3 = 27467 \text{ ciclos} \quad (2-23)$$

Para determinar el par para desplazar la carga se toman los siguientes valores

$$Par = \frac{28,25 \times 5}{2.000 \times \pi \times 0,8} = 0,028 N.m \quad (2-24)$$

Paso = Paso del tornillo en mm = 5mm

P= Peso en N = 28,25

C= Constante 0,8 para tornillo de bolas

### 2.5.2 Sistema vertical

Los cálculos establecidos para el sistema vertical se hacen los cálculos respectivos tomando como referencia los siguientes datos:

$$Y_t = H - \left(\frac{D}{2} + H_t\right) \quad (2-25)$$

H = Altura total máxima de desplazamiento = 405mm

D = Diámetro de la probeta = 100mm

Ht = Altura de la boquilla = 50mm

$$Y_t = 405 - \left(\frac{100}{2} + 50\right) \quad (2-26)$$

$$Y_t = 305mm \quad (2-27)$$

Este resultado define la longitud a mover de acuerdo a los valores establecidos para las variables que definen el movimiento en el sistema vertical.

De acuerdo al manejo y detención del sistema vertical por tiempo, se calculó el tiempo para los parámetros definidos en la ecuación 3-2.

$$t = \left( \frac{T \times Y_t}{H_t} \right) \quad (2-28)$$

$$t = \left( \frac{50 \times 305}{405} \right) \quad (2-29)$$

$$t = 38s \quad (2-30)$$

Es decir si el sistema vertical llegó a la longitud calculada y no se detuvo, lo hace al cabo de 38s, con esto se garantiza la estabilidad del movimiento.

Para determinar el torque máximo permisible se utiliza la potencia y tensión del motor

P= 240W

V=140rpm

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{240W}{140 \frac{rev}{min} \times \frac{1 min}{60s} \times \frac{2\pi}{1 rev}} \quad (2-31)$$

$$T_{m\acute{a}x} = 16,37 \frac{W}{rad/s} = 16,37 W.s \quad (2-32)$$

$$T_{m\acute{a}x} = 16,37 N.m \quad (2-33)$$

Teniendo en cuenta que el tornillo tiene un diámetro de 5/8" y la tuerca que realiza el desplazamiento del sistema tiene 10cm de longitud junto con el número de filetes de acuerdo al paso del tornillo que es 2,3mm nos da un total de 44 filetes

$$T_{m\acute{a}x} = 16,37 N.m \times 44 \quad (2-34)$$

$$T_{m\acute{a}x} = 720 \text{ N.m} \quad (2-35)$$

De acuerdo al valor anterior el torque máximo que realiza el motor es de 720N.m.

Para establecer el torque del motor se realizaron los cculos con las ecuaciones definidas en inicialmente se define el tiempo establecido en la rampa de aceleración como 0,8s y los siguientes datos:

$$Y = \frac{v}{t} X \quad (2-36)$$

$$v_{(t)} = \frac{14,66 \text{ rad/s}}{0,8s} t \quad (2-37)$$

$$v_{(t)} = 18,33t \quad (2-38)$$

Derivando la ecuación obtenida da como resultado:

$$a_{(t)} = \frac{dv(t)}{dt} \quad (2-39)$$

$$a_{(t)} = 18,33 \text{ rad/s} \quad (2-40)$$

Para obtener la fuerza:

$$F = m(a + g\text{sen}\theta + \mu_k g\text{cos}\theta) \quad (2-41)$$

$$F = 18,75kg (18,33 + 9,81 \text{ sen } 16,03 + 0,009 \times 9,81 \text{ cos } 16,03) \quad (2-42)$$

$$F = 410N \quad (2-43)$$

Como se dijo anteriormente, se multiplica el torque calculado por el número de filetes de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$F = 410N$$

$$R = 8mm$$

$$T_{calc} = 410N \times 8mm \quad (2-44)$$

$$T_{calc} = 3,28N.m \quad (2-45)$$

Por el número de filetes:

$$T_{calc} = 3,28 \times 44 \quad (2-46)$$

$$T_{calc} = 144,32 N.m \quad (2-47)$$

De acuerdo con los resultados obtenidos el torque calculado es aproximadamente 144,32N.m de acuerdo con el torque máximo permisible, es suficiente para mover el eje.

### 2.5.3 Sistema de giro

Para el sistema de giro se determinaron las velocidades y frecuencias a partir de mediciones realizadas durante las pruebas de trabajo. De acuerdo a los datos de la tabla 3-1 se eligieron cinco velocidades a partir de las cuales opera el sistema de giro.

En las velocidades de giro elegidas se contempla aquellas más representativas y que responden a las necesidades del recubrimiento, teniendo en cuenta la flexibilidad del trabajo y su variación de acuerdo a las características.

Tabla 2-1 Velocidades determinadas en el sistema de giro

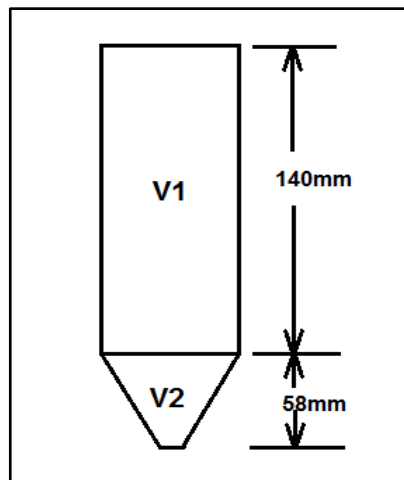
Ensayo	Velocidad (rpm)	Frecuencia (Hz)
1	112	4,5
2	158	6
3	165	6,3
4	168	6,4
5	178	6,8
6	206	7,7
7	217	8,1
8	245	9,15
9	255	9,4
10	620	22

Fuente: Los autores

#### 2.5.4 Sistema de dosificación

Se realizaron los cálculos para determinar la cantidad de material de aporte que puede almacenar el depósito diseñado para la dosificación de polvo, los cálculos se relacionan a continuación:

Figura. 2-19 Soporte dosificador



Fuente: Los autores

$$V_1 = \pi r^2 \times h \quad (2-48)$$

$$V_1 = 841848 \text{ mm}^3 \quad (2-49)$$

$$V_2 = \frac{\pi}{3} r^2 \times h \quad (2-50)$$

$$V_2 = 116255,3 \text{ mm}^3 \quad (2-51)$$

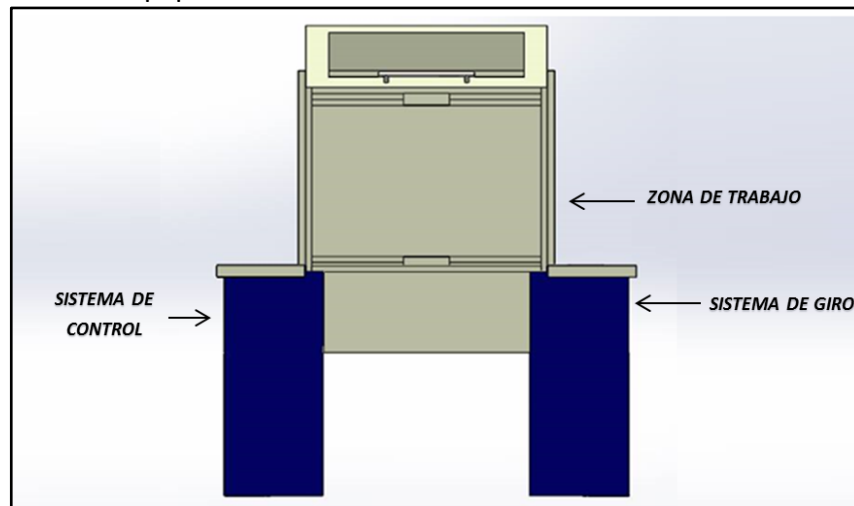
$$V_T = 960 \text{ cm}^3 \quad (2-52)$$

## 2.6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

La estructura del equipo de recubrimiento mostrada en la figura 2-20 cuenta con tres compartimentos que permiten la ubicación del sistema de control, el de giro, y la zona de trabajo donde se encuentran los ejes horizontal y vertical. La rigidez del equipo le permite soportar el peso de los actuadores y demás componentes que hacen parte de él.

La carcasa cuenta con dos tapas laterales removibles que permiten el acceso a la disposición interna en caso de mantenimiento, la ubicación de la puerta en la parte frontal permite el acceso al conjunto de trabajo, y la visualización cuando se encuentra en funcionamiento.

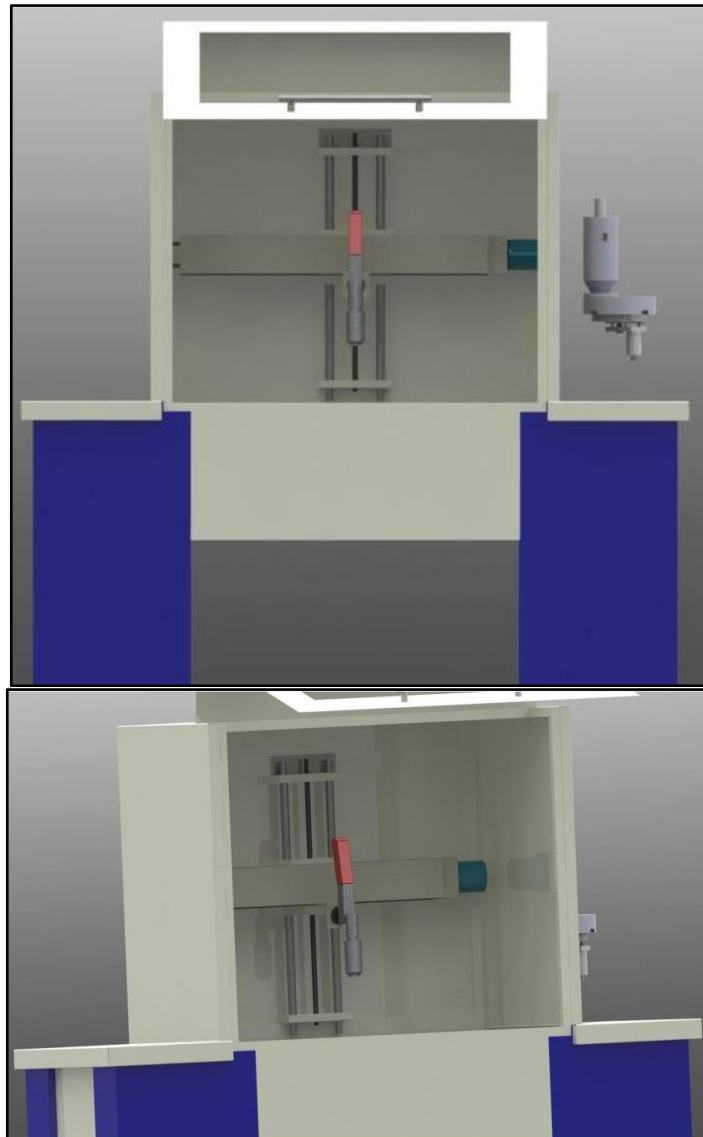
Figura. 2-20 Carcasa equipo de recubrimiento



Fuente: los autores

El diseño de la estructura cuenta con el espacio suficiente para la ubicación de los ejes previstos para satisfacer el recubrimiento. En la figura 2-21 se muestra el diseño CAD de la estructura del equipo de recubrimiento en conjunto, teniendo en cuenta la posición de la antorcha y el sistema de dosificación; esto permite corroborar dimensiones previas a la construcción del ensamble, y posibles ajustes de dimensión.

Figura. 2-21 Equipo de recubrimiento en diseño CAD

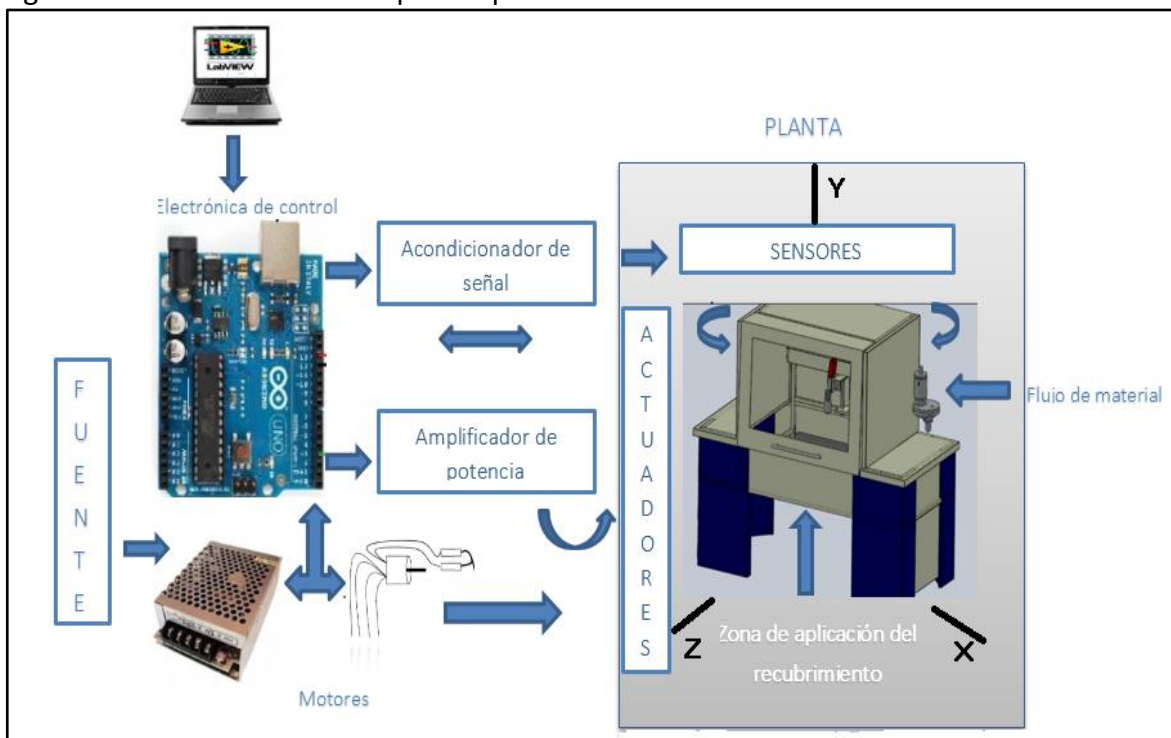


Fuente: los autores

### 3. DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

El sistema electrónico fue diseñado para la recepción y emisión de señales de los sensores y actuadores utilizados. Mediante una tarjeta de adquisición de datos conectada por puerto USB a una computadora, se obtienen y envían señales a través de un software especializado que permite visualizar el proceso y enviar órdenes al sistema, en el cual se realiza una retroalimentación hombre-máquina por medio de una interfaz visual, como se muestra en la figura 4-1.

Figura. 3-1 Sistema de control para la planta



Fuente: Los autores

El sistema de control automático consiste en un sistema de lazo cerrado, en el que la señal de salida influye en la entrada, realizando un proceso de realimentación. El conjunto de control está formado por: un controlador principal que recibe las señales de mando y las emite o recibe las señales emitidas por el sistema y las envía para su posterior visualización de acuerdo a las variables de entrada y salida; para que esto sea posible se hace una integración de los circuitos de acondicionamiento y procesamiento de señales con sus respectivos sensores y actuadores; y uno o múltiples buses (cables) de datos que lo interconectan todo el sistema.



Es importante tener en cuenta que el sistema de Posicionamiento Lineal (SPL) es un sistema de control realimentado o de lazo cerrado el cual tiene como objetivo mover automáticamente a un dispositivo o instrumento sobre una trayectoria recta hacia un punto de referencia dado por el usuario, la dinámica transitoria debe cumplir con ciertas características de desempeño; como tiempo de subida, tiempo de estabilización, porcentaje de sobre-impulso<sup>20</sup>.

### **3.1 SELECCIÓN DEL SOFTWARE CONTROLADOR**

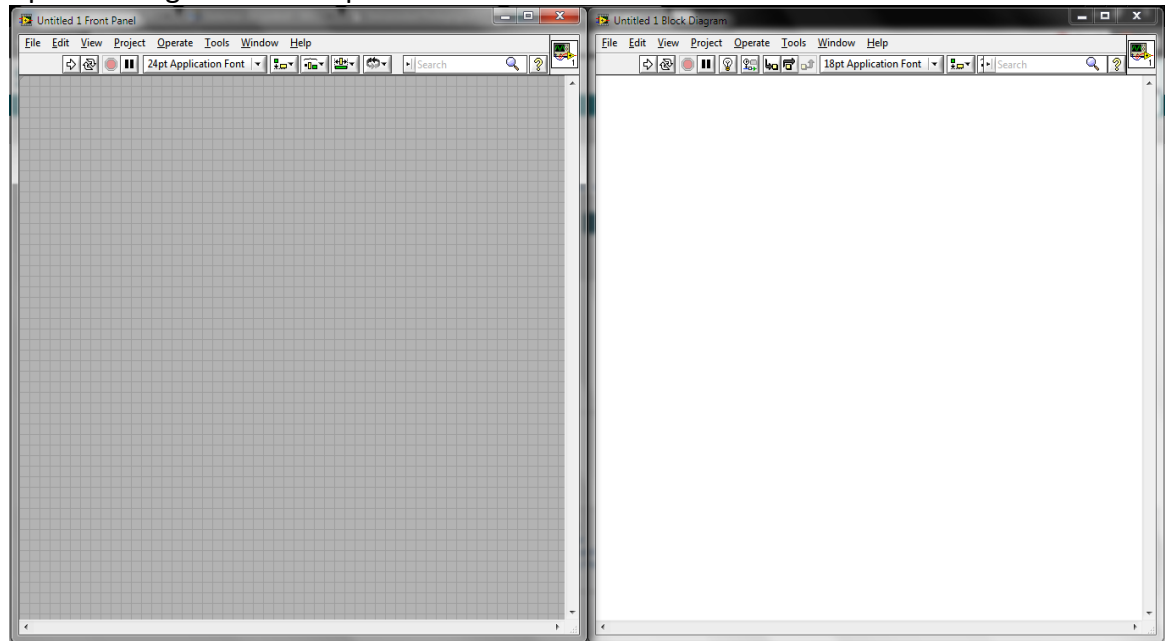
Existen una gran variedad de software para el control de procesos, pero debido a los recursos con los que cuenta la Universidad se selecciona el software LABVIEW 2010, el cual cuenta con las librerías y licencias legales necesarias para el desarrollo de la programación. La ventaja de este software es que cuenta con un lenguaje de programación gráfica, permitiendo que ésta sea más fácil y rápida a comparación de las líneas de comando C++, también cuenta con una serie de librerías que permiten comunicación con diferentes tipos de tarjetas de adquisición de datos.

LABVIEW 2010 permite crear una interfaz gráfica de usuario o GUI (Graphical User Interface) que hace una perfecta comunicación entre el usuario y la máquina para tener el control del proceso. En la imagen 3-3 se observa las dos ventanas de visualización del programa, el panel frontal, a la izquierda es la visualización de los controles e indicadores de programación, es decir, la interfaz visual al usuario. A la derecha de la imagen se encuentra el panel de programación o diagrama de bloques, es la parte no visible para el usuario en donde se define el control y las variables a manipular.

---

<sup>20</sup> CHANG, T., WYSK, A., y WANG, H. Computer-Aided Manufacturing. New Jersey: Second Edition, Prentice Hall. 1998.

Figura. 3-2 Ventanas de visualización de labview 2010 a la derecha panel frontal a la izquierda diagrama de bloques



Fuente: Los autores

### 3.2 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR PRINCIPAL

En automatización y el control, se cuenta con una serie de controladores de diferentes marcas, referencias y precios. Para la selección de éste, es importante tener en cuenta el tipo de dispositivo, por tanto es fundamenta establecer los factores que influyen en las características mencionadas como son: número y tipo de variable a controlar, costo, compatibilidad con el software de control y puerto de comunicación (TCP/IP o USB). En la tabla 3-1 se muestran las variables del sistema para el control del equipo de recubrimiento por proyección térmica.

Tabla 3-1 Variables del sistema

Ítem	Nombre	Tipo de señal	Categoría
1	Encendido Fuente	Digital On/Off	Salida
2	Encendido Variador	Digital On/Off	Salida
3	Control Motor DC Agitador	Digital PWM	Salida
4	Control Motor DC Dosificador	Digital PWM	Salida
5	Movimiento Ascendente	Digital On/Off	Salida
6	Movimiento Descendente	Digital On/Off	Salida
7	Habilitador de Motor Paso a Paso	Digital On/Off	Salida
8	Dirección de Motor Paso a Paso	Digital On/Off	Salida
9	Pulsos de Motor Paso a Paso	Digital On/Off	Salida
10	Movimiento Rotacional	Digital On/Off	Salida
11	Control de Velocidad Mov. Rotacional	Digital On/Off	Salida
12	Sensor Fin de Curso Superior	Digital On/Off	Entrada
13	Sensor Fin de Curso Inferior	Digital On/Off	Entrada
14	Sensor Fin de Curso Derecha	Digital On/Off	Entrada
15	Sensor Fin de Curso Izquierda	Digital On/Off	Entrada
16	Sensor de Temperatura	Análoga	Entrada
17	Accionamiento de Electroválvula	Digital On/Off	Salida

Fuente: los autores

El número de variables su tipo y la categoría de las mismas permite esclarecer y dar prioridad de las características del controlador a elegir.

Basándose en los factores de selección se utilizaron dos tarjetas óptimas para el control del proceso, respecto al número y tipo de entradas y salidas, compatibilidad de software, conexión USB:

- Arduino Mega 2560
- NI USB-6009

La diferencia de estas tarjetas se observa en su marca y su valor comercial, mientras que la Arduino Mega 2560 costaba \$120.000 COP, la NI USB 6009: \$748.000 COP. Es por esta razón que se obtiene el controlador Arduino Mega 2560.

### 3.2.1 Arduino Mega 2560

La tarjeta Arduino Mega 2560<sup>21</sup> está basada en el microcontrolador ATmega2560. Tiene 54 pines de entradas/salidas digitales (14 de las cuales pueden ser utilizadas como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serial por hardware), cristal oscilador de 16 Mhz, conexión USB, Jack de alimentación, conector ICSP y botón de reset; incorpora todo lo necesario para que el microcontrolador trabaje. En la figura 3-4 se muestra la tarjeta seleccionada.

Figura. 3-3 Tarjeta Arduino Mega 2560 seleccionada



Fuente: [http://hifiduino.files.wordpress.com/2012/03/arduinomega2560\\_r2\\_front.jpg](http://hifiduino.files.wordpress.com/2012/03/arduinomega2560_r2_front.jpg)

### 3.2.2 Comunicación

La Comunicación entre la tarjeta Arduino y el computador, se realiza por comunicación serie a través de un cable USB. Para poder crear una comunicación entre el software de control y la memoria del controlador Arduino utiliza los pines 0 (RX0) y 1 (TX0) para recibir y transmitir, respectivamente, la información, así que se debe olvidar de utilizar estos pines en proyectos que impliquen la utilización del puerto serie.

La programación de la tarjeta controladora requiere instalar en el computador, el software Arduino adicional a LabView, debido a que se debe cargar un firmware<sup>22</sup>, que es

<sup>21</sup> BANZI, M, *et al.* Arduino Mega 2560. [Online] 2012. <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>.

<sup>22</sup> Ledezma, Filemon. Labview-arduino [Online] 2009. <http://es.slideshare.net/FilemonLedezmaAlmendras/arduino-lab-view-15963313>

un bloque de instrucciones de máquina para propósitos específicos, grabado en una memoria, normalmente de lectura/escritura; de la siguiente forma:

- i. Instalar Labview 2010
- ii. Instalar Controladores VISA NI
- iii. Instalar JKI VI Package Manager (VIPM)
- iv. Instalar desde el VIPM, la librería de la interfaz de LabVIEW para Arduino
- v. Conectar la placa Arduino a su PC
- vi. Cargar de la interfaz de LabVIEW para Arduino el firmware encontrado en: C:\Program Files (x86)\National Instruments\LabVIEW 2010\vi.lib\LabVIEW Interface for Arduino\Firmware\LIFA\_Base
- vii. Ejecutar el archivo LIFA\_Base.ino, el cual se ejecuta con Arduino.
- viii. Una vez ejecutado ir a herramientas, seleccionar en tarjeta: Arduino Mega 2560 ó Mega ADK, y seleccionar en puerto: el COM configurado por defecto al conectar la arduino.
- ix. Cargar el firmware
- x. Usar la librería de LabVIEW para Arduino.

### **3.3 SELECCIÓN DE LOS ACTUADORES**

Los actuadores seleccionados para el accionar de los movimientos fueron:

*Movimiento Vertical:* debido a que el sistema vertical debe mover el conjunto horizontal por medio de un tornillo de potencia sin variar su velocidad, su función es buscar la posición de trabajo, por estas razones se selecciona un Motorreductor 24 VDC de 140 rpm, el motor utilizado se muestra en la figura 3-5.

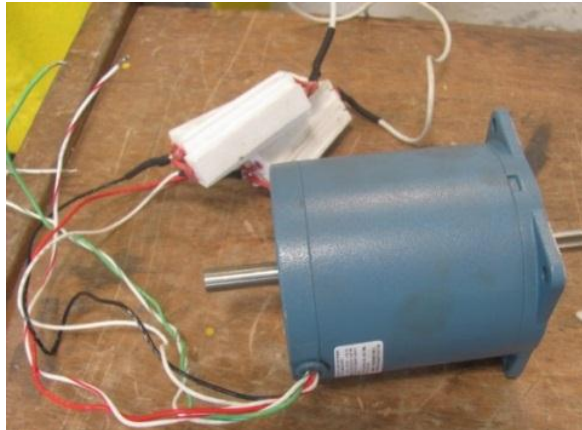
Figura. 3-4 Motor de corriente continua utilizado en la implementación



Fuente: Los autores

*Movimiento Horizontal:* El conjunto horizontal requirió una precisión de movimiento exacta debido a que algunas características del recubrimiento dependen del desplazamiento que la antorcha realice y la longitud de la probeta, es fundamental tener el control para variar la velocidad en este movimiento, ya que es una variable que influye de forma directa en el recubrimiento. Por tanto se selecciona un motor paso a paso de 200 pasos por vuelta, de 4A con una tarjeta controladora de 24 VDC, mostrado en la figura 3-6, el cual conduce el motor a medio paso, es decir en una vuelta del motor hay 400 pasos, el datasheet se encuentra en el Anexo B ya que viene configurada para dar más precisión.

Figura. 3-5 Motor paso a paso



Fuente: Los autores

*Movimiento de Rotacional:* La selección de este actuador, se relacionó con el peso de la probeta de mayor tamaño, junto con la velocidad de giro requerida. Siguiendo estos lineamientos se selecciona un motor de AC de 0.6 HP junto con un variador de velocidad WEG como se muestra en la figura 3-7.

Figura. 3-6 Variador de velocidad y motor de corriente alterna



Fuente: Los autores

*Dosificador:* Para el dosificador se tienen dos actuadores, uno para el movimiento del agitador, y el movimiento del plato dosificador, el control de velocidad del motor de éste último, es de vital importancia pues de acuerdo a la rapidez que desplaza el plato se estableció el flujo de la cantidad de polvo que caerá en la ranura y posteriormente se expulsara, para realizar el recubrimiento. Por ende se emplean dos motores DC de 12V de 100 rpm mostrados en la figura 3-8.

Figura. 3-7 Motores utilizados para movimiento del dosificador



Fuente: Los autores

*Flujo de Gas de Dosificación:* La función que debe cumplir este actuador es el de una válvula controlada de forma remota, ya que se debe accionar únicamente en el tiempo de dosificación para evitar acumulación de material de recubrimiento. Por consiguiente, se utiliza una electroválvula, el cual es un dispositivo electromecánico controlado por una corriente eléctrica mostrado en la figura 3-9.

Figura. 3-8 Electroválvula



Fuente: Los autores

### 3.4 SELECCIÓN DE LOS SENSORES.

Los sensores seleccionados corresponden al control de posicionamiento y temperatura del sistema. Para el posicionamiento se partió de la necesidad de definir los puntos máximos y mínimos de los movimientos vertical y horizontal, por tanto se elige cuatro (4) sensores fin de carrera mostrados en la imagen 3-10 que son accionados mecánicamente.

Figura. 3-9 Sensor fin de curso



Fuente: Los autores



*Encoder para posicionamiento:* controla las revoluciones exactas que da el motor y así tener un registro exacto del mismo. El encoder es el encargado de frenar en el punto exacto que ordena el control al motor. La función del éste, es convertir el movimiento en señales eléctricas para retroalimentarlas al controlador, en la figura 3-11 se observa en Encoder implementado para control de movimiento del sistema vertical.

Figura. 3-10 Encoder para control de posicionamiento



Fuente: Los autores

*Sensor infrarrojo:* Para el control de temperatura en el proceso de calentamiento se utiliza un sensor que funcione a distancia y del que se pueda extraer la información para iniciar el recubrimiento, y poder llevarla a un software. Para cumplir con esos requerimientos se seleccionó un sensor infrarrojo mostrado en la figura 3-12 las características del sensor se encuentran en el Anexo B.

Figura. 3-11 Sensor infrarrojo

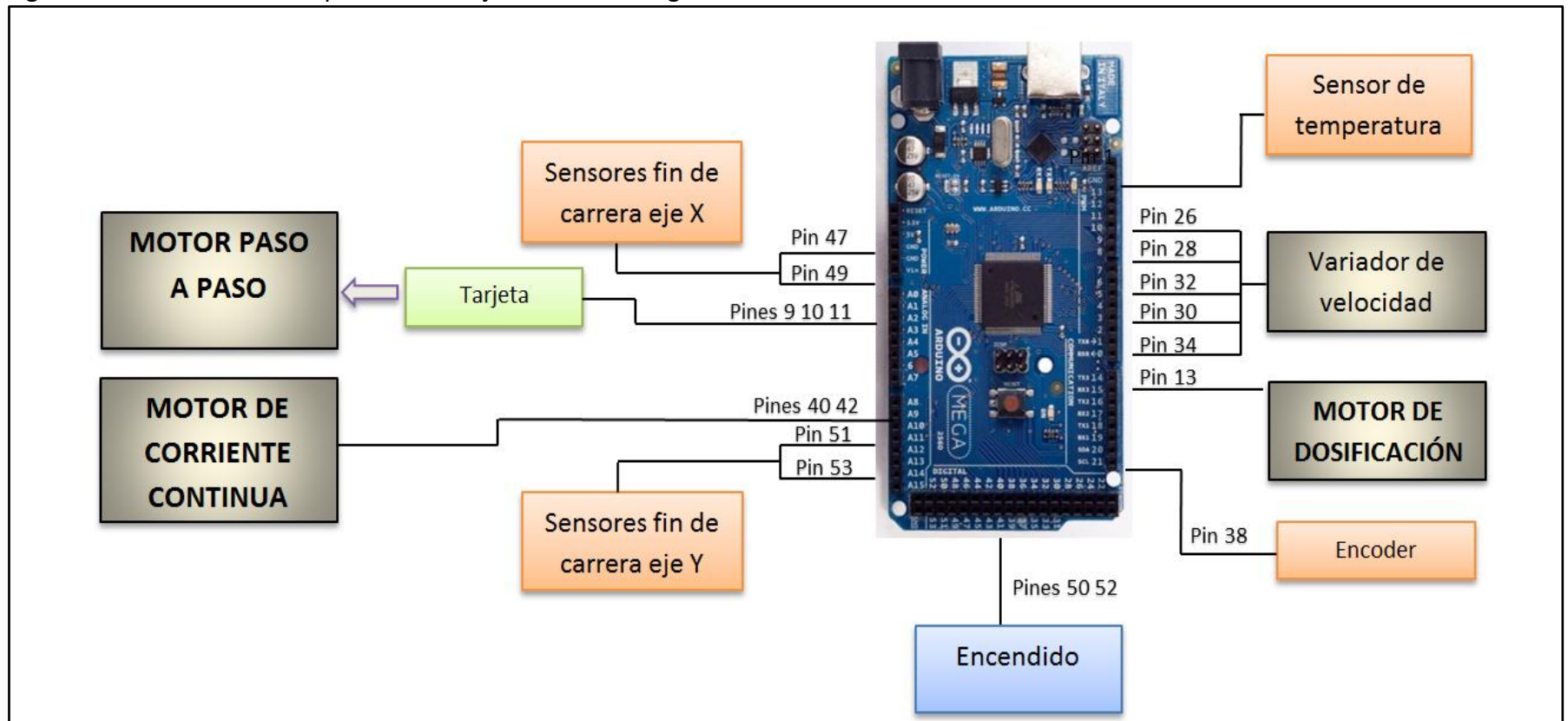


Fuente: Los autores

### **3.5 DISTRIBUCIÓN DE PINES DE CONEXIÓN**

De acuerdo a las especificaciones dadas acerca de la tarjeta arduino mega, sus ventajas y características, se estableció la distribución de pines para todas las señales que se retroalimentan con las tarjetas controladoras, los actuadores, los sensores y los elementos que hacen parte del sistema electrónico. En la figura 3-13 se muestra la distribución de pines para el control del equipo de recubrimiento por spray térmico.

Figura. 3-12 Distribución de pines de la tarjeta Arduino Mega 2506



Fuente: Los autores

### **3.6 DISEÑO DE LOS CIRCUITOS IMPLEMENTADOS DE POTENCIA Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL DE ACTUADORES Y SENSORES**

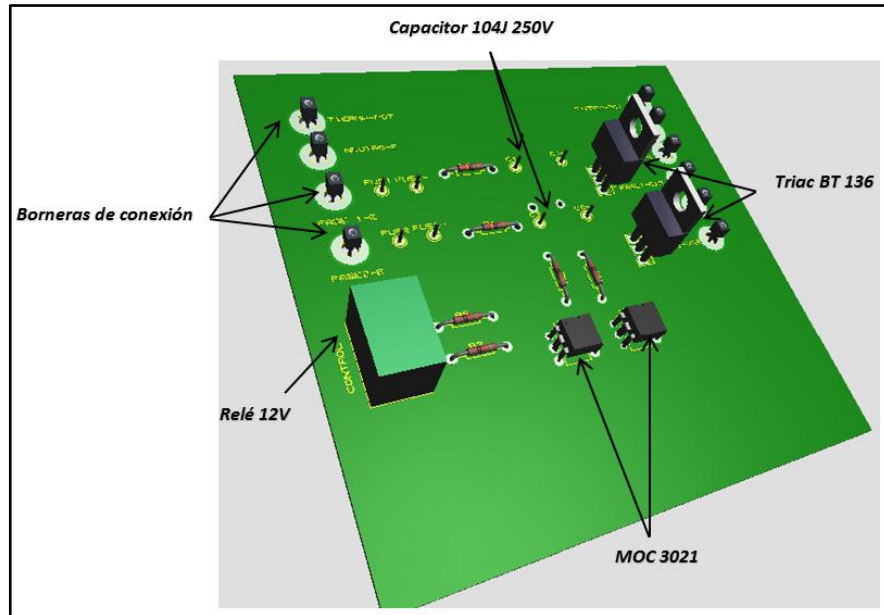
Para la lectura y envío de cada señal desde la tarjeta de adquisición de datos, fué necesario garantizar que la señal requerida llegara de la forma correcta, para esto se implementó a cada una, un circuito según su nivel de tensión, ya sea de acondicionamiento o de potencia. El diseño de estos circuitos se realizó en el software Proteus 7, el conexionado generado se hizo gracias al complemento Proteus ARES, junto con su visualización 3D para poder observar la distribución de los dispositivos en la placa. A continuación se describen los circuitos utilizados; y en el Anexo B se encuentran los diagramas de conexión con los componentes utilizados y sus respectivas conexiones.

#### **3.6.1 CIRCUITO DE POTENCIA DE ENCENDIDO**

El equipo de recubrimiento por spray térmico tuvo un diseño para su conexión a través de un sistema bifásico; para su control fue necesario opto acoplar las dos fases, debido a que se puede enviar una señal de 5 Vdc desde el computador y conmutar un circuito de 120Vac. Para esto, se diseñó un circuito de potencia con un opto Triac MOC 3021, el cual envía la señal la compuerta de un TRIAC BT 136 que cumple la función de interruptor de corriente alterna. Adicionalmente se hizo un filtro pasa bajas, conformado por un condensador en serie con una resistencia, con el fin de proteger los elementos de las frecuencias altas se dispone de un fusible de 10 A para la protección de sobrecorrientes.

En la figura 3-14 se ve el diseño del circuito de potencia de encendido con sus componentes electrónicos y distribución en la baquela.

Figura. 3-13 Diseño de la tarjeta controladora para el circuito de encendido

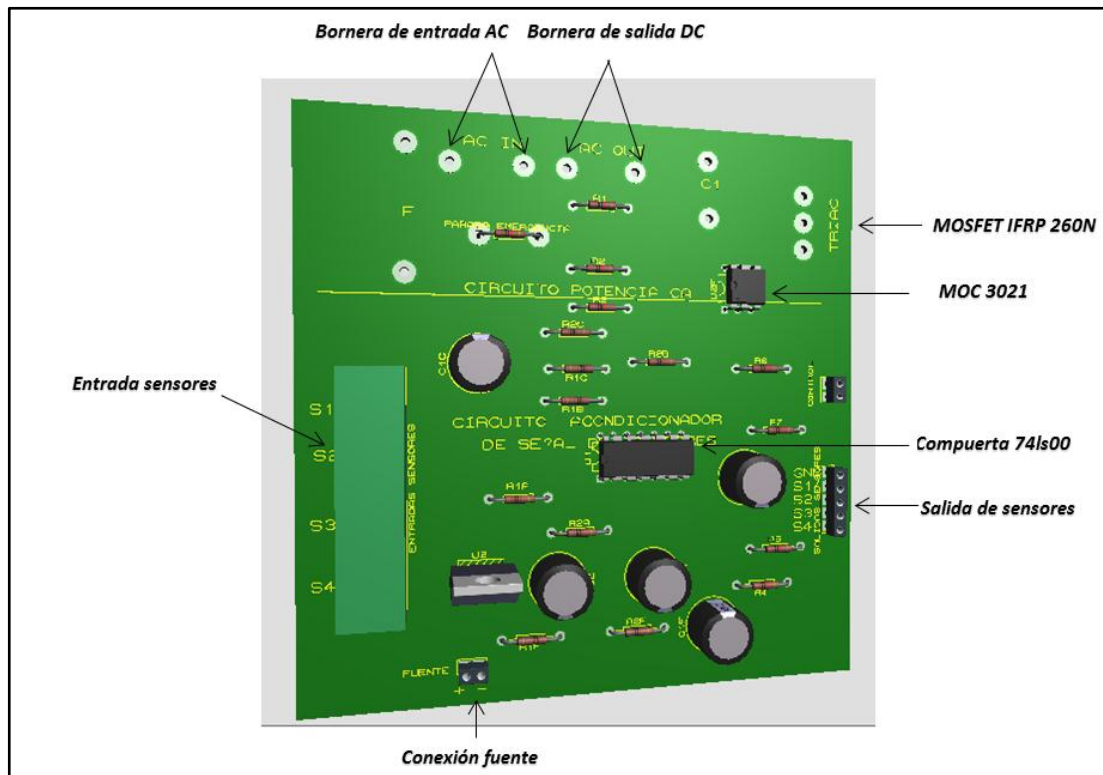


Fuente: Los autores

### 3.6.2 CIRCUITO DE PARADA DE EMERGENCIA Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL A SENSORES FIN DE CARRERA

Esta tarjeta de control mostrada en la figura 3-15 está dividida en dos circuitos independientes, uno de ellos es la parada de emergencia y el circuito acondicionador de señal encargado del control de los sensores fin de carrera. En caso de presentar una situación de emergencia se interrumpe una de las fases del circuito anterior, adicionando un pulsador que es la parada de emergencia; es decir se realiza el opto acople de la señal para controlar el encendido desde el computador y en serie al fusible se ubica el pulsador de emergencia. Para el acondicionamiento de señal, se tiene una etapa de filtrado de señal con un filtro pasa bajas, adicionalmente se utiliza una compuerta NAND 74ls00 para garantizar el estado binario de la conmutación de los sensores; para finalizar se limita la corriente con una resistencia de 10 K $\Omega$  para la lectura en el controlador principal, esto se hace en cada uno de los sensores.

Figura. 3-14 Diseño de la tarjeta controladora para la parada de emergencia y sensores



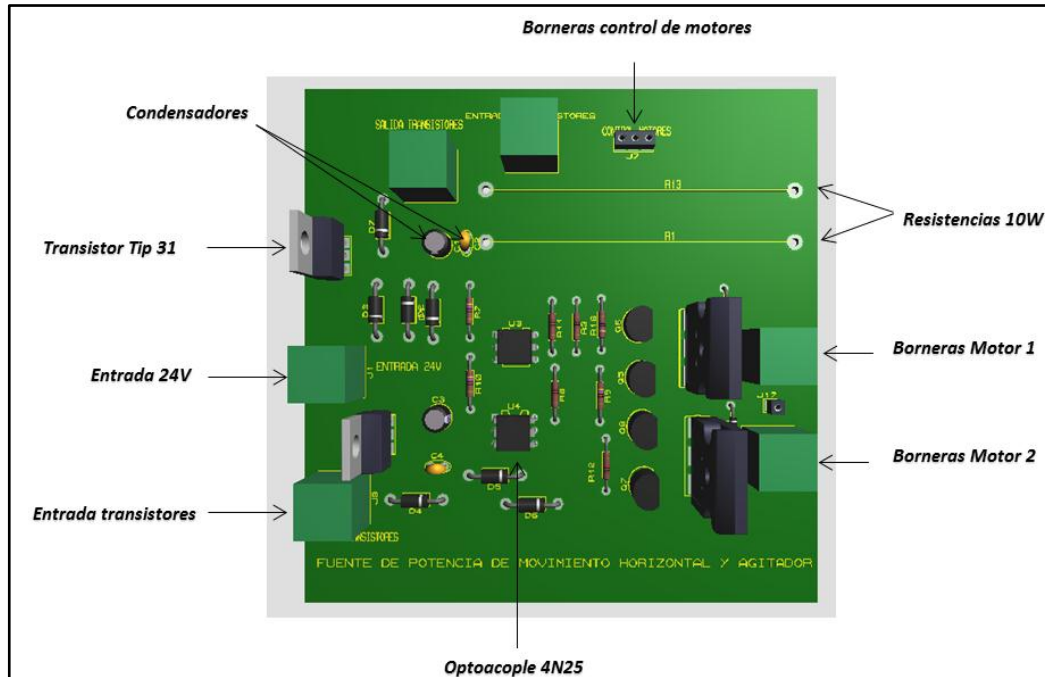
Fuente: Los autores

### 3.6.3 CIRCUITOS DE POTENCIA DE MOTOR PASO A PASO Y MOTORES DE DOSIFICADOR

Para el circuito de potencia del motor paso a paso se realizó una etapa de amplificación de corriente con seis transistores 2N3055 (NPN) en configuración DARLINGTON, debido a efectos de temperatura no se diseñó en una placa, se disponen sobre un disipador de calor en aluminio con aislamiento especial para evitar un posible cortocircuito, el diseño de la placa cuenta con las borneras para la conexión de entrada y salida de los transistores.

El motor paso a paso es controlado por su respectiva tarjeta de control donde se realiza una retroalimentación entre los datos ingresados y las señales generadas, logrando el control de potencia del motor. En la figura 3-16 se muestra la vista 3D del diseño para el movimiento horizontal y el sistema de dosificación.

Figura. 3-15 Diseño de la tarjeta para el control del motor paso a paso



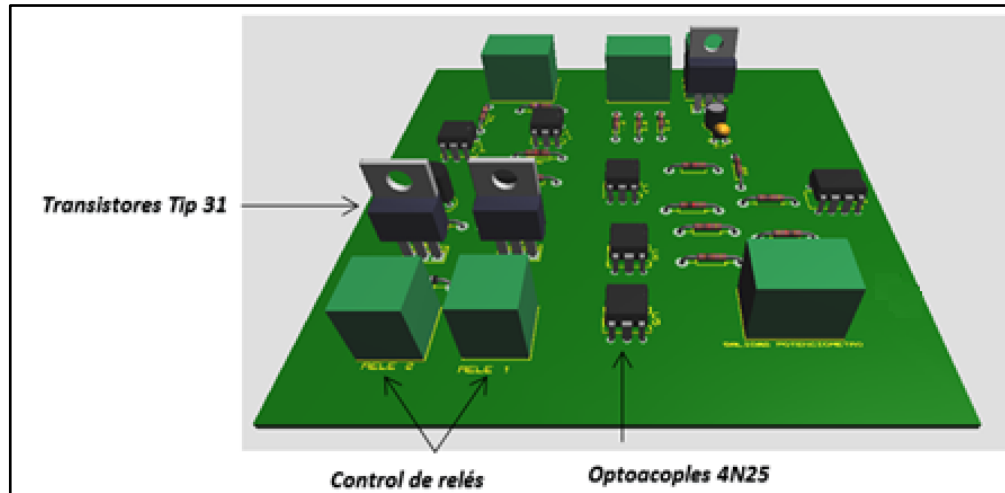
Fuente: Los autores

### 3.6.4 CIRCUITO DE POTENCIA PARA EL CONTROL DEL MOVIMIENTO VERTICAL

Para el control del movimiento vertical se contó con dos relés que tiene una condición, si ambos están activados, no hay movimiento, lo que garantiza la estabilidad del sistema evitando un posible daño al equipo de recubrimiento.

En la figura 3-17 se muestra el diseño de la tarjeta empleada para este movimiento, con sus componentes y distribución óptima para sus respectivas conexiones.

Figura. 3-16 Diseño de la tarjeta controladora encargada del movimiento vertical



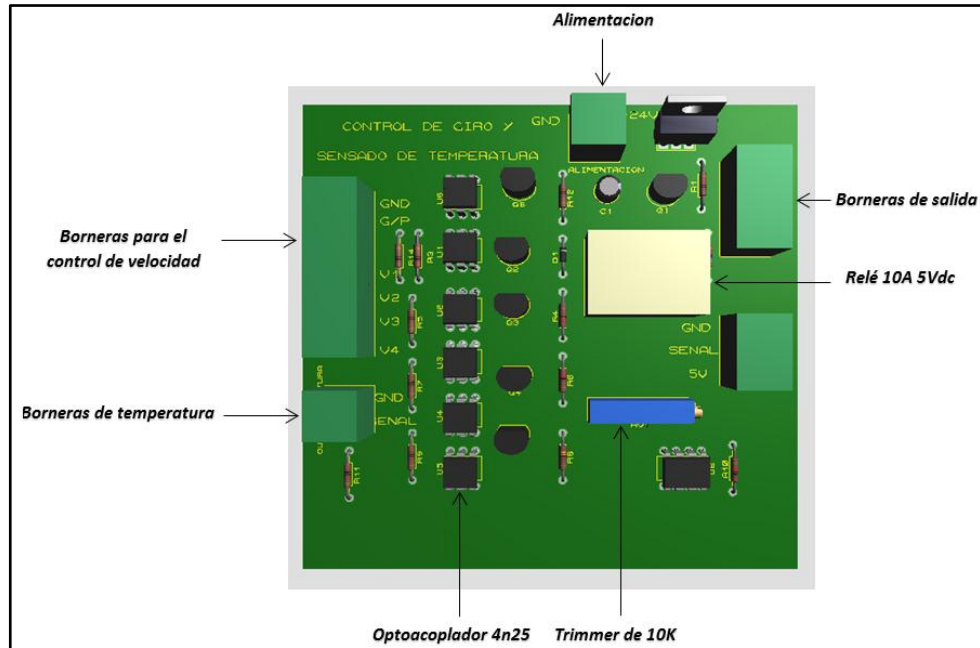
Fuente: Los autores

### 3.6.5 CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL A SENSOR INFRARROJO Y CONTROL DE VELOCIDAD DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.

Para el control de temperatura de la probeta sometida a recubrimiento se utilizó un sensor infrarrojo que calcula la temperatura en base a la energía infrarroja emitida por el objeto, teniendo en cuenta estas características se realiza el circuito dónde se establecen las borneras de conexión al sensor, en la figura 3-18 se observa el diseño de éste circuito con las borneras definidas para salidas y entradas. Para el control de la velocidad del sistema de giro se realiza el cálculo del valor de las resistencias requeridas para obtener la velocidad deseada. Se utiliza un relé de 10A, el cual es capaz de controlar el circuito de salida que tiene mayor potencia que el de entrada.



Figura. 3-17 Tarjeta controladora para el sensor infrarrojo y control de velocidad de giro

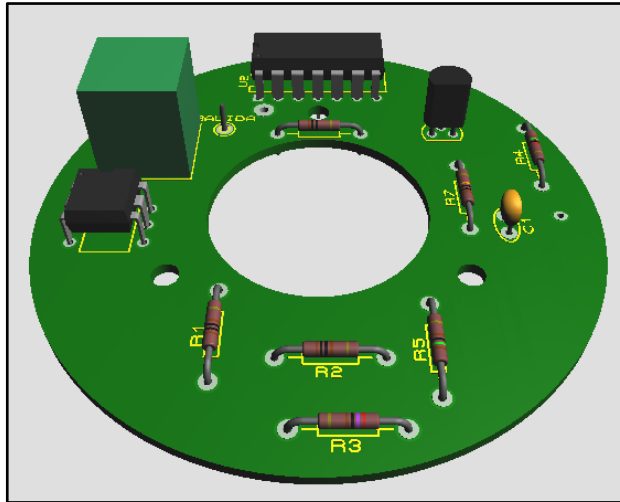


Fuente: Los autores

### 3.6.6 CIRCUITO ACONDICIONADOR DE SEÑAL PARA ENCODER DE POSICIONAMIENTO

Para la lectura de posición del movimiento vertical se realiza el diseño de un contador de pulsos, el cual consta de un sensor óptico de presencia-ausencia, y para garantizar el estado binario, se acondiciona la señal por medio de una compuerta NAND, y un filtro pasa altas, esta parte del circuito es opto acoplada para evitar daños en el controlador principal. En la figura 3-19 se muestra el circuito acondicionador de señal diseñado para el encoder de posicionamiento.

Figura. 3-18 Circuito para Encoder de posicionamiento

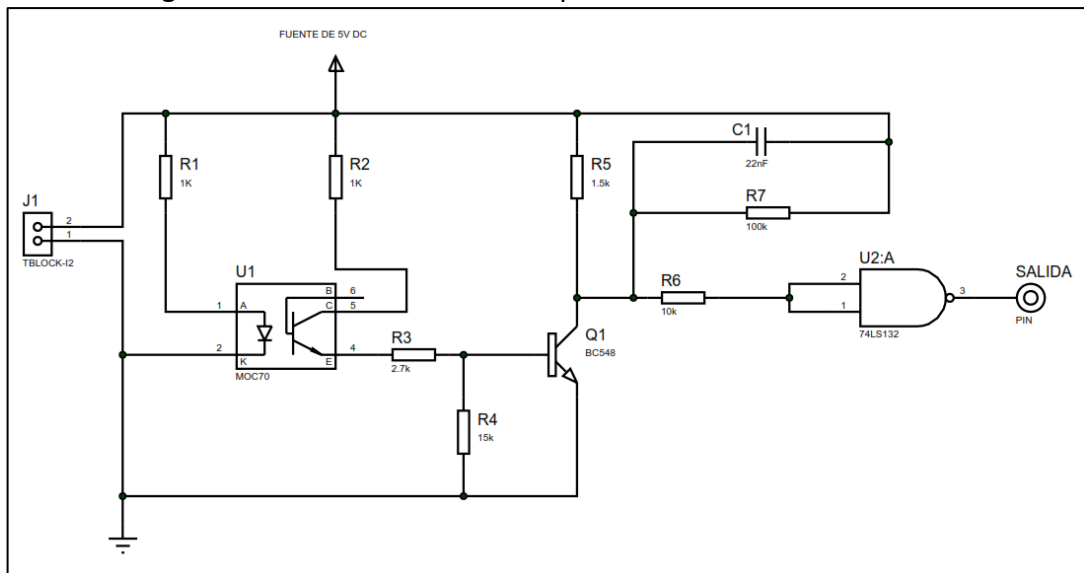


Fuente: Los autores

Un ejemplo del diagrama de conexión de los circuitos anexados, se encuentra en la figura 3-20, el cual muestra los elementos necesarios para el funcionamiento y su respectiva conexión del encoder de posicionamiento.

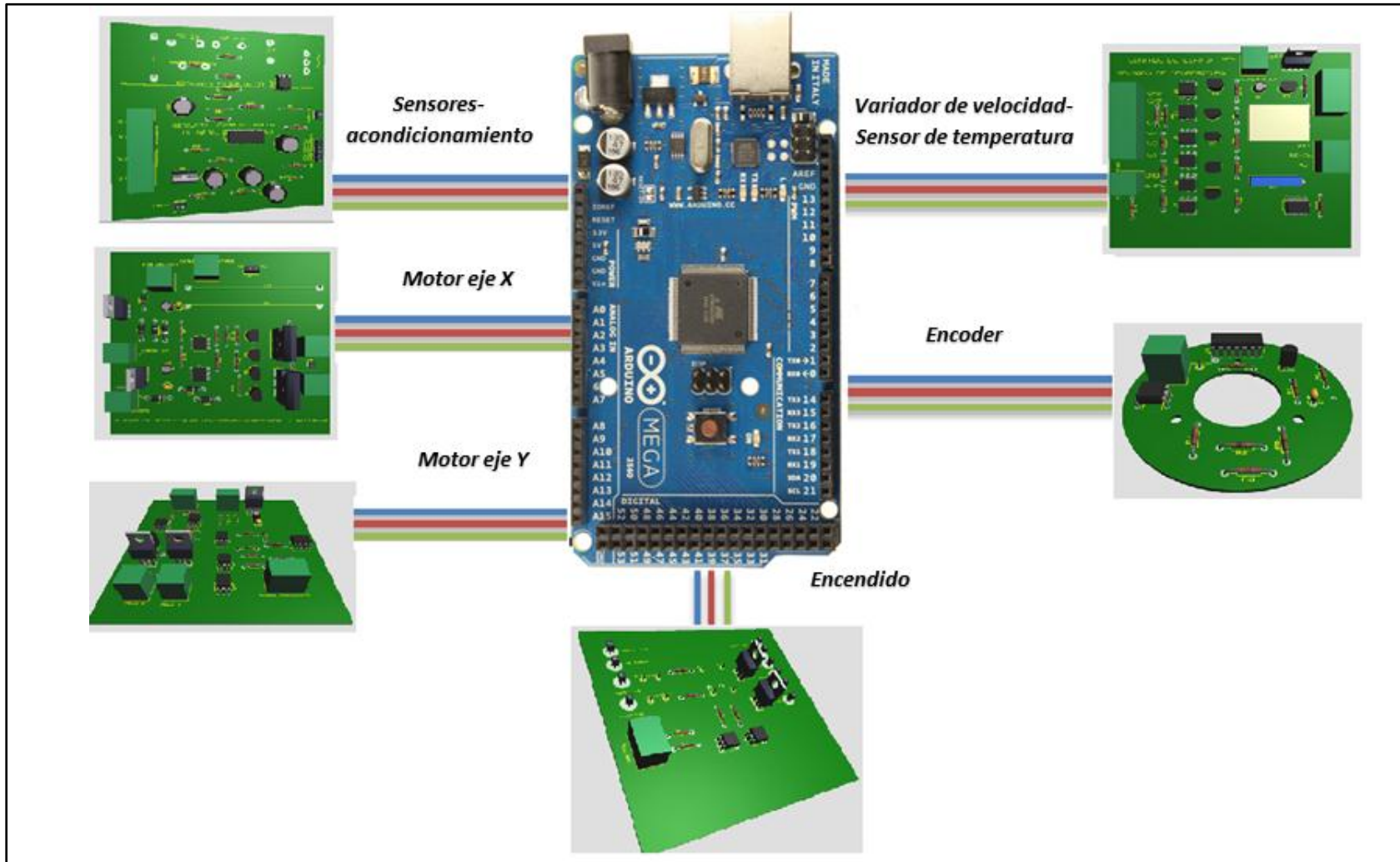
Para el control del equipo de recubrimiento por spray térmico se usaron diversos componentes electrónicos, actuadores, sensores, integrados con las tarjetas controladoras que hacen una retroalimentación de datos y señales, la integración general del componente electrónico se muestra en la figura 3-21.

Figura. 3-20 Diagrama de Conexión de los componentes del encoder.



Fuente: Los autores

Figura. 3-191 Disposición general de los circuitos de los componentes electrónicos del equipo de recubrimiento



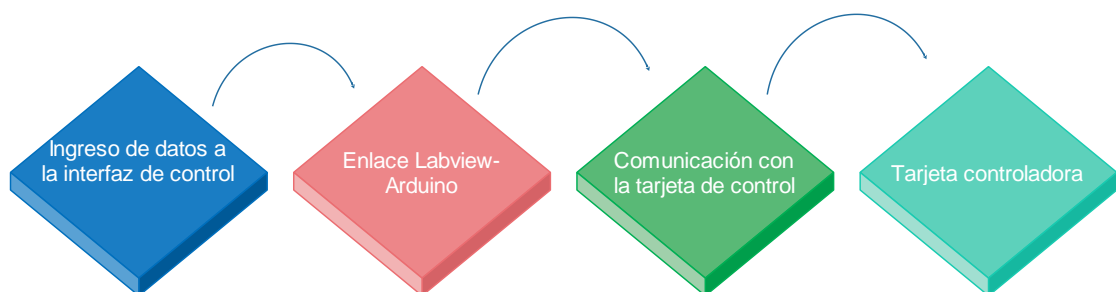
Fuente: Los autores

#### 4. DESARROLLO DE LAS HERRAMIENTAS SOFTWARE PARA EL GOBIERNO DEL EQUIPO DE RECUBRIMIENTO POR SPRAY TÉRMICO

El control del equipo de recubrimiento por proyección térmica, requirió una interfaz gráfica, la cual le brinde al usuario la posibilidad de establecer los parámetros de trabajo de acuerdo al tipo de recubrimiento; es por esto que se requiere el uso de la interfaz de control creada en Labview para arduino, que brinda la alternativa de gobierno de dichos parámetros y de actuadores, sensores y elementos que hacen parte del conjunto, con una visualización gráfica que facilita su interpretación.

Los actuadores interpretan los datos ingresados y ejecutados gracias a la interfaz descrita, a partir de éste proceso se realiza un enlace y retroalimentación de señales que permiten la comunicación con la tarjeta controladora y los elementos encargados de actuar después de recibir la información ingresada, es decir el sistema mecánico es gobernado por la interfaz hombre-máquina, que a su vez envía la información correspondiente a la tarjeta de control y ésta la traduce en salidas de paso, dirección y movimiento de correspondientes motores que gobiernan los ejes de movimiento; se genera una retroalimentación con los sensores que envían información de posición de acuerdo a los datos introducidos inicialmente. En la figura 4-1 se muestra una gráfica que simplifica el proceso de control del sistema.

Figura. 4-1 Gráfica de control del sistema



Fuente: los autores

La interfaz referida permite establecer características de control de una manera que el usuario puede trabajarla sin necesidad de tener conocimientos de los programas descritos, para ello se realiza la programación de cada una de las etapas de funcionamiento, incluyendo movimientos vertical, horizontal, giro, control de temperatura, dosificador; se definen las unidades respectivas y se establecen medidas de emergencia en caso que se requieran.

Mediante la automatización se pueden manejar datos en tiempo real, en este caso mediante el control del software y la interfaz correspondiente se puede evaluar cada parte del proceso y su correcta ejecución, teniendo en cuenta características de control que le permiten al usuario ejecutar, pausar o detener el proceso de manera instantánea.

Gracias al lenguaje de programación de alto nivel con el que cuenta LabVIEW puede usarse para aplicaciones específicas, como es el caso del control del equipo de recubrimiento; se busca crear un sistema de programación modular, donde cada secuencia creada llame otras secuencias y éstas a su vez otras de menor nivel, en una cadena de comandos de continuidad. Así cuando se use un módulo o estructura, no se requiere saber cómo funciona internamente, únicamente se debe conocer sus entradas y salidas para los enlaces de proceso<sup>23</sup>.

El programa cuenta con un instrumento virtual o VI, que es una representación gráfica en forma de diagramas de bloque que contiene la función que debe realizar y responde a especificaciones puntuales y funcionales que se diseñe, lo que permite establecer las entradas y salidas correspondientes de acuerdo a las condiciones iniciales. Se crearon varios VI, en la interfaz para ahorrar memoria RAM y simplificar la programación.

Las condiciones de trabajo del equipo de recubrimiento por proyección térmica requerían una programación efectuada de manera secuencial respondiendo a las siguientes restricciones:

- En caso de emergencia se deben establecer mecanismos de detención del programa ejecutado de manera inmediata.
- En la programación se define la continuidad de los procesos de acuerdo a la caracterización del recubrimiento y sus prioridades de trabajo.
- Se debe obtener y mostrar los datos de proceso en tiempo real, por medio de un monitoreo presentado en forma de gráficos o texto que permita su interpretación.
- El proceso de trabajo inicia cuando sus ejes coordenados se encuentran en posición de referencia.
- La activación de cada proceso requiere una aprobación antes de su ejecución.
- El programa debe responder a los datos ingresados inicialmente, calculando distancias y posiciones necesarias para cumplir las condiciones, ejecutadas a través de los actuadores.
- Debe ser posible el ajuste de las condiciones de trabajo cuando se requiera.
- La programación establecida debe tener la capacidad de mantener los valores ingresados dentro de los límites definidos.

---

<sup>23</sup> Roncancio, Henry. Tutorial de LabVIEW. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Laboratorio de Electrónica. 2001.

En la tabla 4-1 se muestra los Sub Vis diseñados para la programación del equipo de recubrimiento, se definen las entradas y salidas correspondientes.

Tabla 4-1 Diagramas de bloque implementados

Nombre del Sub Vi	Símbolo	Entradas	Salidas
Encendido		<ul style="list-style-type: none"> <li>Comunicación</li> <li>Fuente</li> <li>Error</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Motor de giro</li> </ul>
Posición de referencia		<ul style="list-style-type: none"> <li>Comunicación</li> <li>Abortar 1</li> <li>Abortar 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leds Indicadores</li> </ul>
Motor paso a paso		<ul style="list-style-type: none"> <li>Comunicación</li> <li>Velocidad de pasos</li> <li>Pasos a mover</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dirección</li> <li>Enable</li> </ul>
Motor vertical		<ul style="list-style-type: none"> <li>Comunicación</li> <li>Subir</li> <li>Bajar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leds Indicadores</li> </ul>
Motores dosificador		<ul style="list-style-type: none"> <li>Comunicación</li> <li>Agitador</li> <li>Plato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leds Indicadores</li> </ul>
Sensores		<ul style="list-style-type: none"> <li>S1</li> <li>S2</li> <li>Plato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>S3</li> <li>S4</li> </ul>
Motor de giro		<ul style="list-style-type: none"> <li>Comunicación</li> <li>Selección de velocidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leds Indicadores</li> </ul>

Fuente: los autores

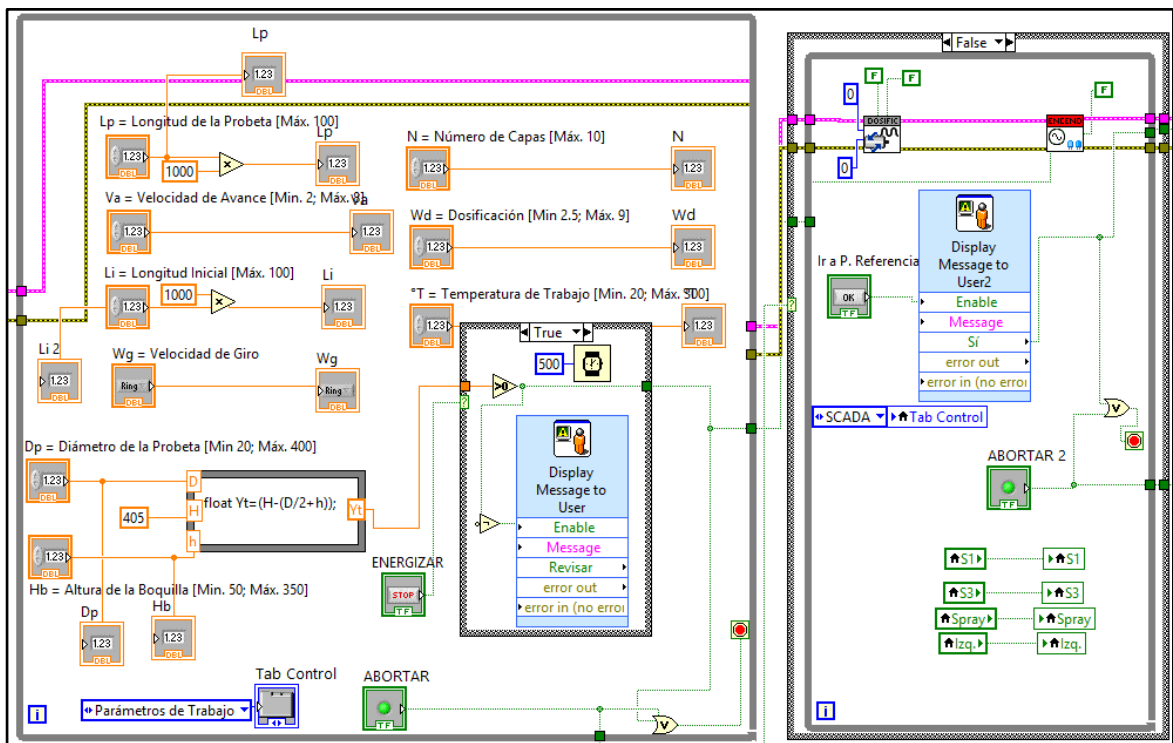
Para el control del equipo de recubrimiento por spray térmico se realizó una programación secuencial completa donde se realiza el proceso de recubrimiento con cada una de las etapas necesarias para cumplir con las características requeridas en el trabajo.

A continuación se describen dichas etapas que se encuentran enlazadas y responden al algoritmo de programación realizado en función de los requerimientos establecidos.

## 4.1 INTRODUCCIÓN DE DATOS

En la imagen 4-2 se muestra las primeras estructuras encargadas de recopilar los datos y enviar la orden para el encendido de fuente; se definieron las variables de entrada indicadas en los bloques de control, se cuenta con un condicional, el cual permite establecer si la altura establecida para posicionamiento del sistema es la correcta, de acuerdo a la programación realizada se definió que si el valor generado es menor que cero se pide revisar datos por medio de una ventana emergente, de lo contrario sigue el proceso de encender fuente.

Figura. 4-2 Programación para introducción de datos



Fuente: los autores

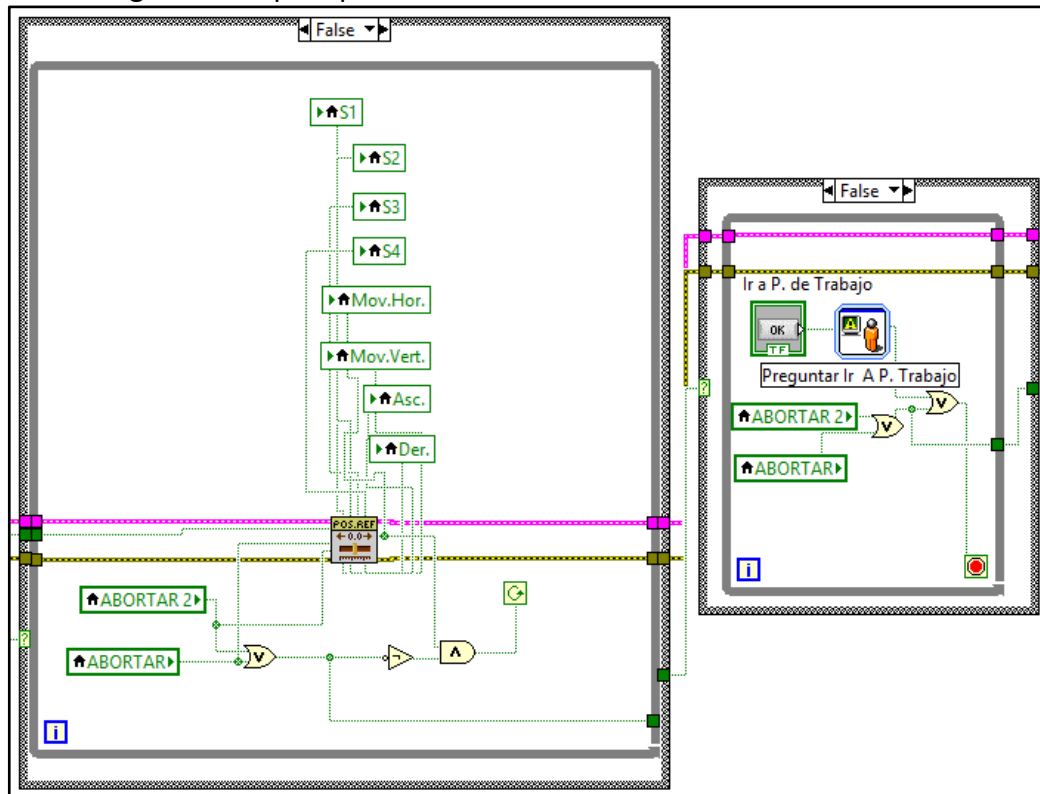
Como se muestra en la figura existe un nodo de fórmula, donde se introdujeron las ecuaciones correspondientes al cálculo de la restricción para el movimiento mencionado y permite generar la acción que da paso al siguiente bloque de programación. Teniendo en cuenta la función que debe cumplir la primera etapa se utiliza una estructura *while loop*, la cual trabaja mientras no se le dé un control de detención, en este caso es el tipo de dato booleano llamado "energizar" como se indica en la imagen.

Después de haber efectuado la primera secuencia y abandonado la estructura, una ventana emergente aparece y pregunta si desea continuar o abortar el proceso, con esto se garantiza un control en todo el proceso.

## 4.2 POSICIÓN DE REFERENCIA

Para la posición de referencia es necesaria la señal inmediatamente anterior, encendido de fuente, la cual activa una nueva estructura *while loop* que contiene el Sub VI llamado posición de referencia, al activarse los sensores S3 y S1 envía una señal de ejecutado el ciclo, y sale de la estructura después de cumplir su función. En la figura 4-3 se muestra el algoritmo de programación empleado para posición de referencia.

Figura. 4-3 Programación para posición de referencia

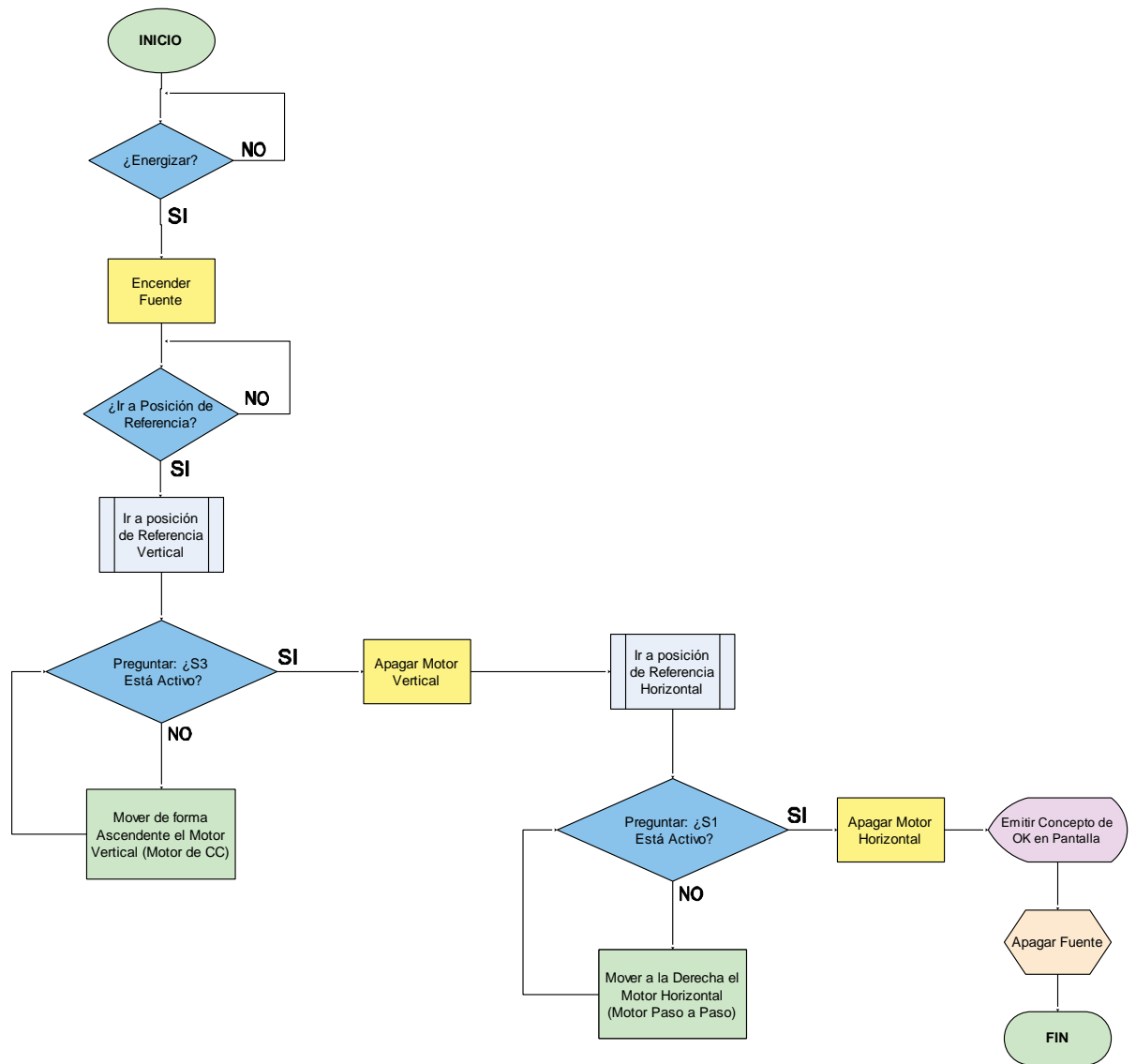


Fuente: los autores

Para realizar dicho algoritmo, se tuvo en cuenta una secuencia lógica inicial, mostrada en el diagrama de flujo de la figura 4-4 con los pasos de trabajo necesarios para ejecutar el proceso de ir a posición de referencia.

Figura. 4-4 Diagrama de flujo para posición de referencia





Fuente: los autores

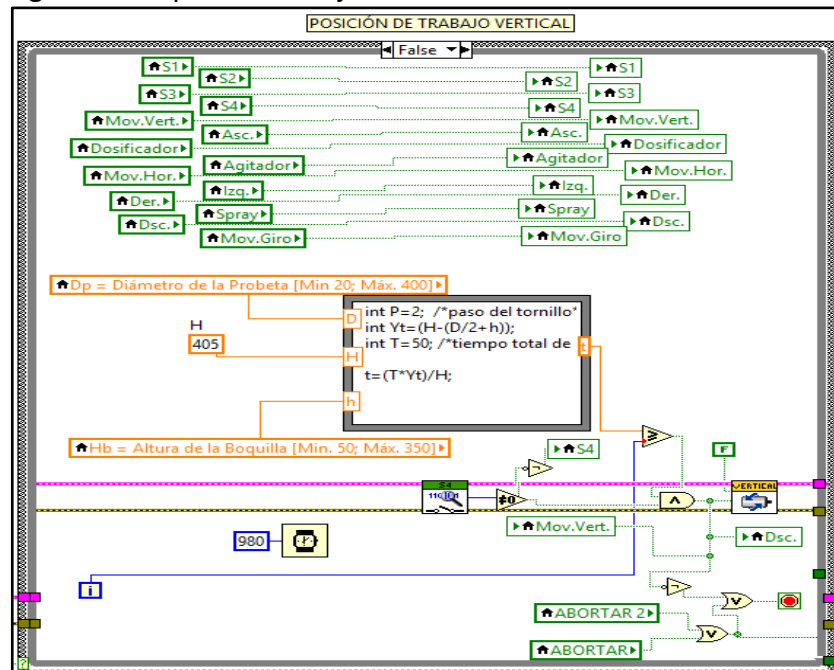
### 4.3 POSICIÓN DE TRABAJO VERTICAL

Después de haber emitido una señal de control, se activa una estructura *while loop* que contiene la posición de trabajo vertical, como se muestra en la figura 4-5, nuevamente contiene un nodo de formula y el Sub Vi correspondiente, en este caso se realizó la programación para que se controle por tiempo, en forma simultánea, es decir en caso que llegue a fallar el conteo de motor se detenga por tiempo.

Se encuentra un *wait* encargado de esperar 980 mS antes de repetir la secuencia de acuerdo a la forma de funcionamiento de la estructura. Se establecieron varias formas de control en caso de falla, al cumplir n iteraciones (segundos) termina su proceso, en caso de que se active el sensor 4, o abortar.

El motor es controlado definiendo una frecuencia de trabajo, teniendo un ciclo Dutty del 50%; el funcionamiento inicia cuando se envía la señal de activación de la tarjeta driver, y es controlada por un módulo enable y dirección. El estado de trabajo de enable se define con 0 y 1 donde el estado bajo permite el funcionamiento y 1 bloqueo es decir la respuesta es negada. Es necesario activar la siguiente etapa para continuar con el trabajo horizontal, por medio de la ventana emergente que permite avanzar a la siguiente estructura.

Figura. 4-5 Programación para el trabajo vertical



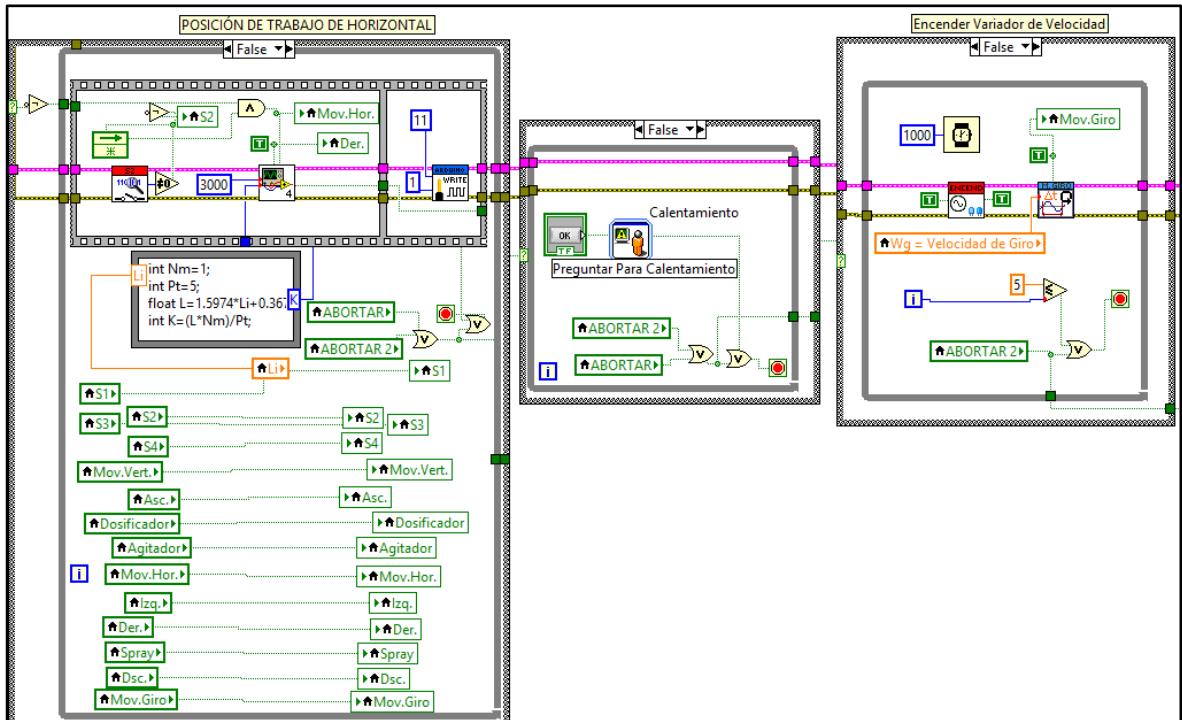
Fuente: los autores

#### 4.4 POSICIÓN DE TRABAJO HORIZONTAL Y VARIADOR DE VELOCIDAD

Una vez llega a posición de trabajo vertical prosigue con trabajo horizontal, el cual consta de una estructura *while* loop y del Sub Vi programado de acuerdo a condiciones de trabajo, como se muestra en la figura 4-6.

En posición de trabajo horizontal se llega a la posición de trabajo general, activándose una ventana emergente de calentamiento la cual el usuario debe atender indicando si desea continuar o detener, en caso de continuar se enciende el variador de velocidad que da tiempo de esperar 5s para que la velocidad del motor de giro alcance las revoluciones esperadas.

Figura. 4-6 Programación para el trabajo horizontal y encendido de variador de velocidad



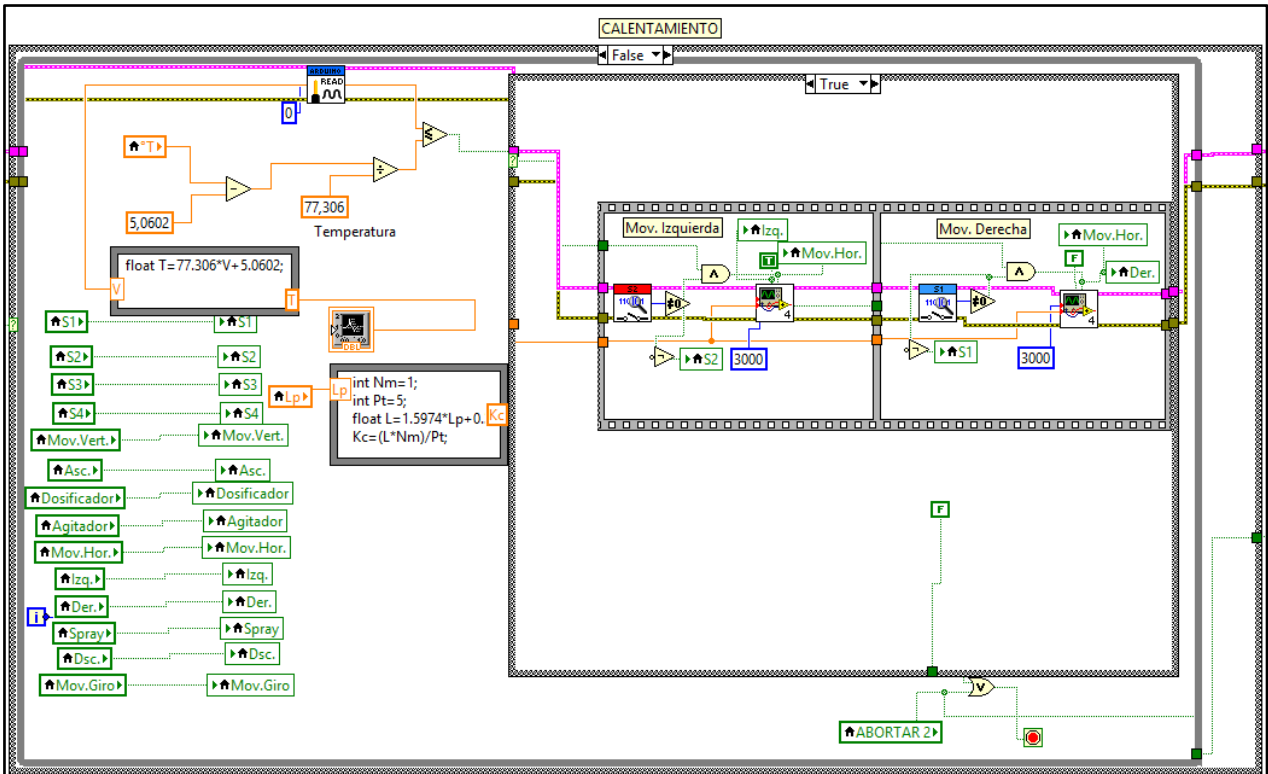
Fuente: los autores

Una vez transcurrido el tiempo de trabajo se activa el sensor de temperatura, en caso que la temperatura a la que se encuentre no es la programada se moverá el motor horizontal de izquierda a derecha  $n$  veces hasta que alcance la temperatura requerida para iniciar el recubrimiento.

#### 4.5 CALENTAMIENTO

En calentamiento se hace la lectura del sensor de temperatura, inicialmente, se realizan dos pasadas, toma la lectura y nuevamente realiza un desplazamiento correspondiente a dos pasadas más, hasta que la temperatura de trabajo sea la que se definió inicialmente para el recubrimiento, en la figura 4-7 se muestra el algoritmo de programación para la etapa de calentamiento.

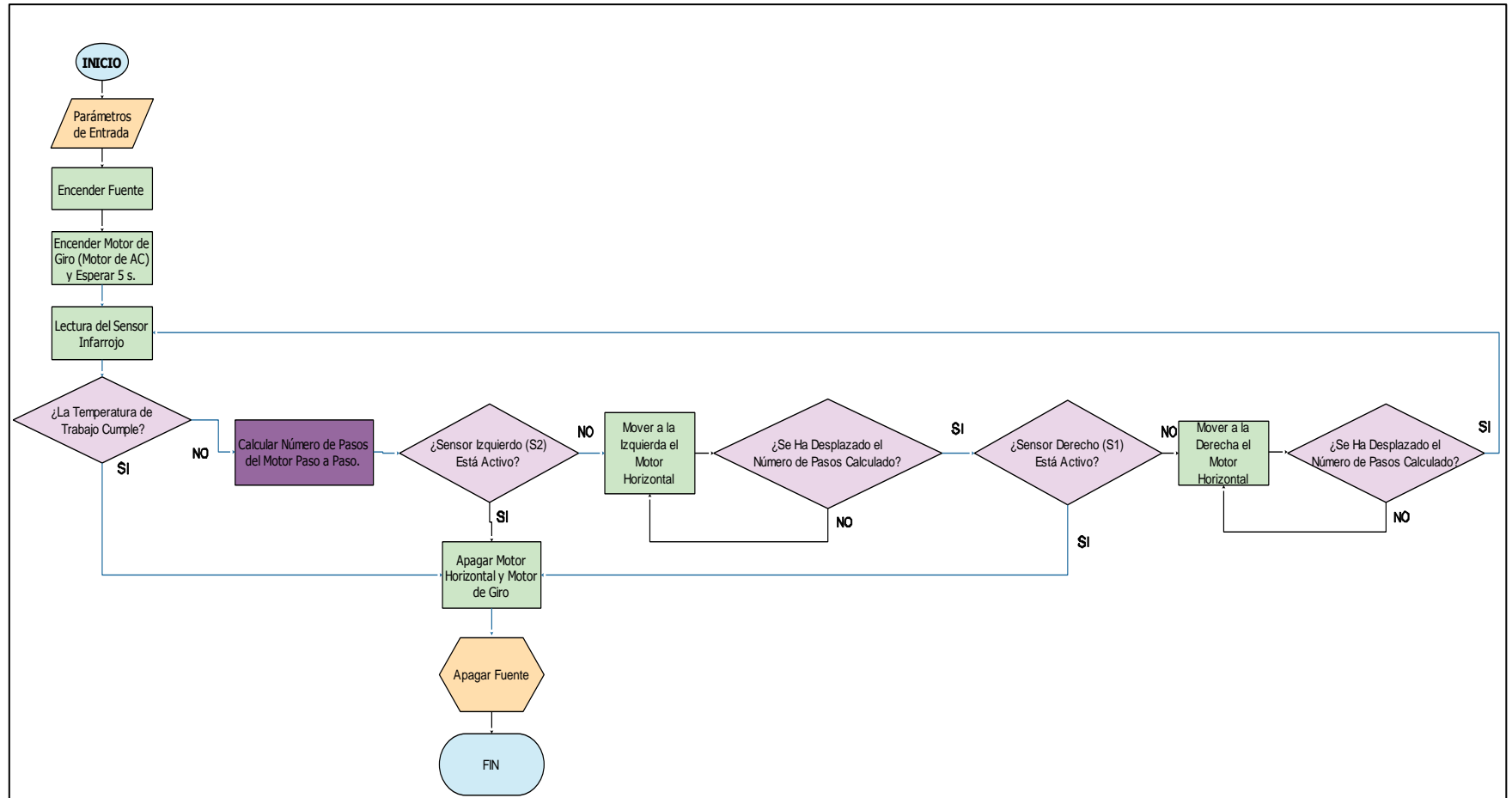
Figura. 4-7 Programación para el calentamiento



Fuente: los autores

Para realizar la programación de la etapa de trabajo se realizó un bosquejo previo plasmado en el diagrama de flujo de la figura 4-8 donde se indica el proceso de calentamiento, iniciando con los parámetros a configurar y estableciendo el proceso para la activación de los motores.

Figura. 4-8 Diagramas de flujo del proceso de calentamiento

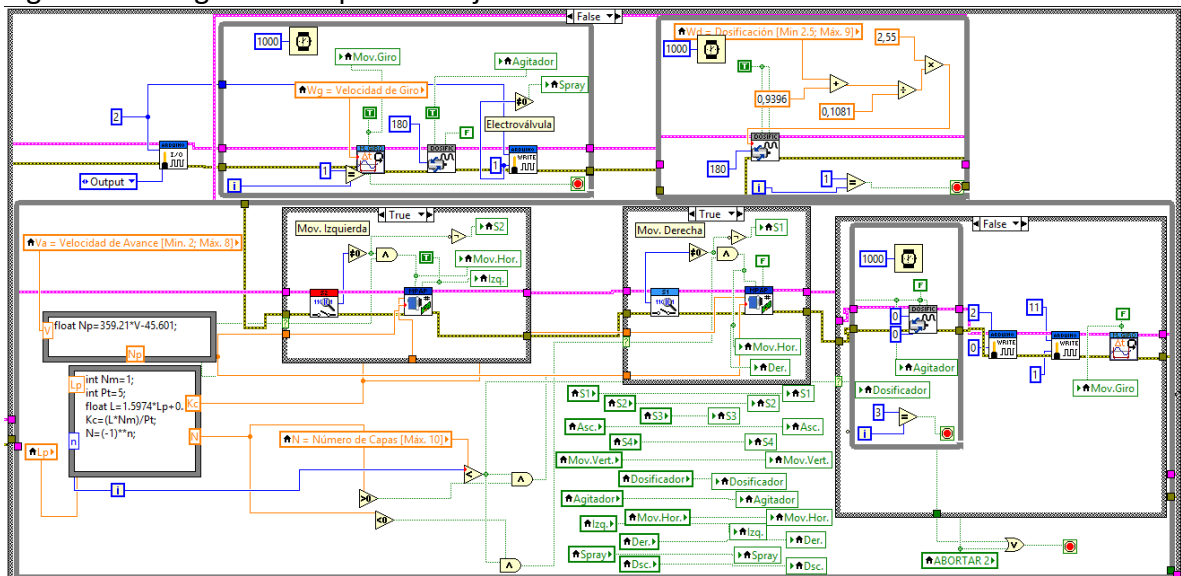


Fuente: Los autores

## 4.6 TRABAJO

Una vez abandonado la estructura anterior, inicia el movimiento del agitador y de forma posterior se activa la electroválvula que permite el paso de los gases utilizados para el recubrimiento, una vez completado el tiempo de espera equivalente a 2s se energiza el plato dosificador el cual debe esperar 3s para que se llene la ranura dosificadora y la distribución de polvo sea uniforme. En seguida se mueve el motor horizontal  $n$  veces dependiendo el número de capas elegidas inicialmente, una vez terminado el número de capas, apaga plato dosificador, espera un tiempo equivalente a 3s desactiva la electroválvula junto con el agitador, y se apaga el motor de giro, finalizando esta fase de proceso. En la figura 4-9 se muestra la programación realizada con las estructuras elegidas de acuerdo a las condiciones de trabajo que se realizan.

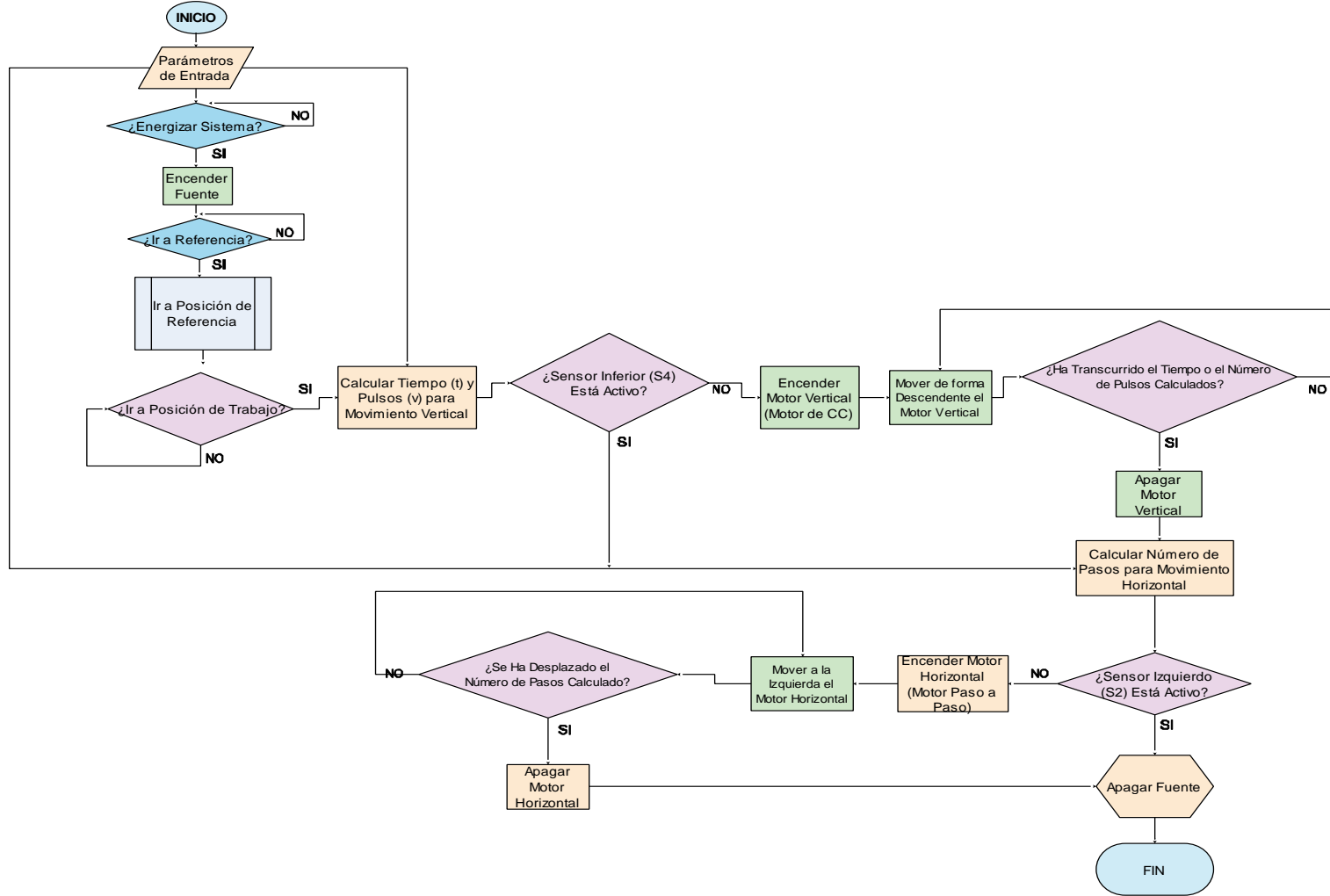
Figura. 4-9 Programación para trabajo



Fuente: los autores

En la figura 4-10 se observa el diagrama de flujo directamente relacionado con la programación secuencial del algoritmo, dónde se establece los condicionales que se deben tener en cuenta para la programación del trabajo.

Figura. 4-10 Diagrama de flujo para trabajo

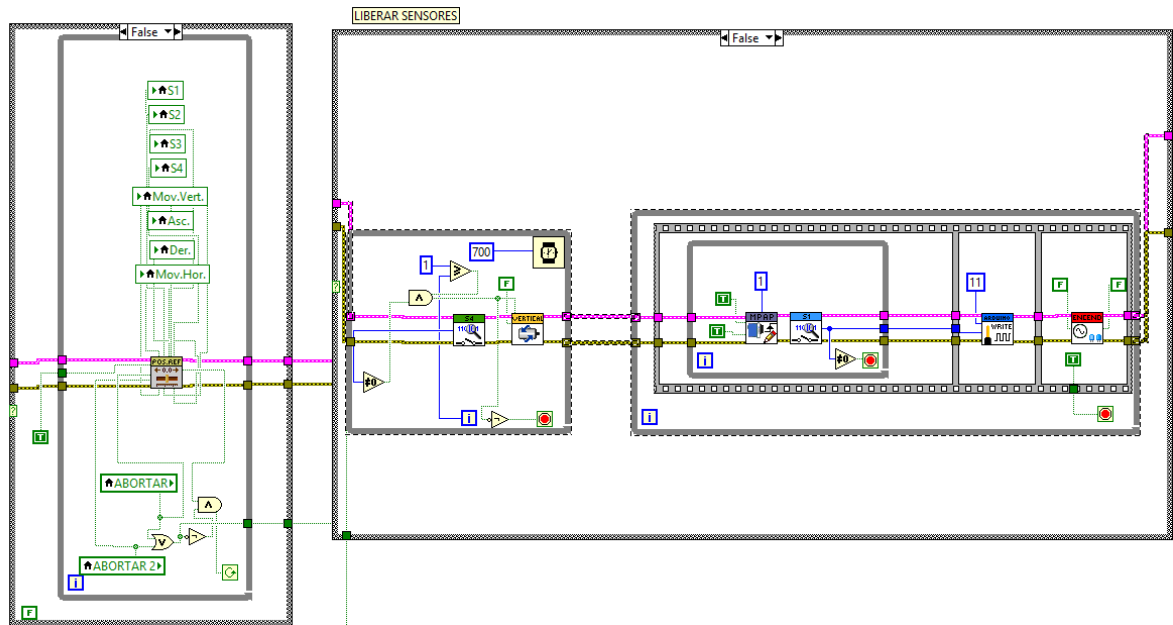


Fuente: los autores

## 4.7 LIBERAR SENSORES

Una vez finalizada la etapa anterior se lleva la antorcha a posición de referencia, cuando se encuentra en posición de referencia se liberan sensores haciendo lectura de ellos y ejecutando el movimiento hasta que cambie de estado, cuando finalizan los dos movimientos se apagan motores y se desactiva la fuente de energía.

Figura. 4-11 Programación para liberar sensores



Fuente: los autores

Para la ejecución de los Sub Vi se aprovecharon las ventajas que posee Labview, gracias al lenguaje de tipo multiproceso se pueden ejecutar varias partes del programa simultáneamente, al definir los parámetros iniciales, se desarrollan secuencialmente. Debido al lenguaje gráfico el compilador con que cuenta Labview es más versátil ya que sobre el mismo código de programación se puede ver fácilmente el flujo de datos, así como su contenido<sup>24</sup>.

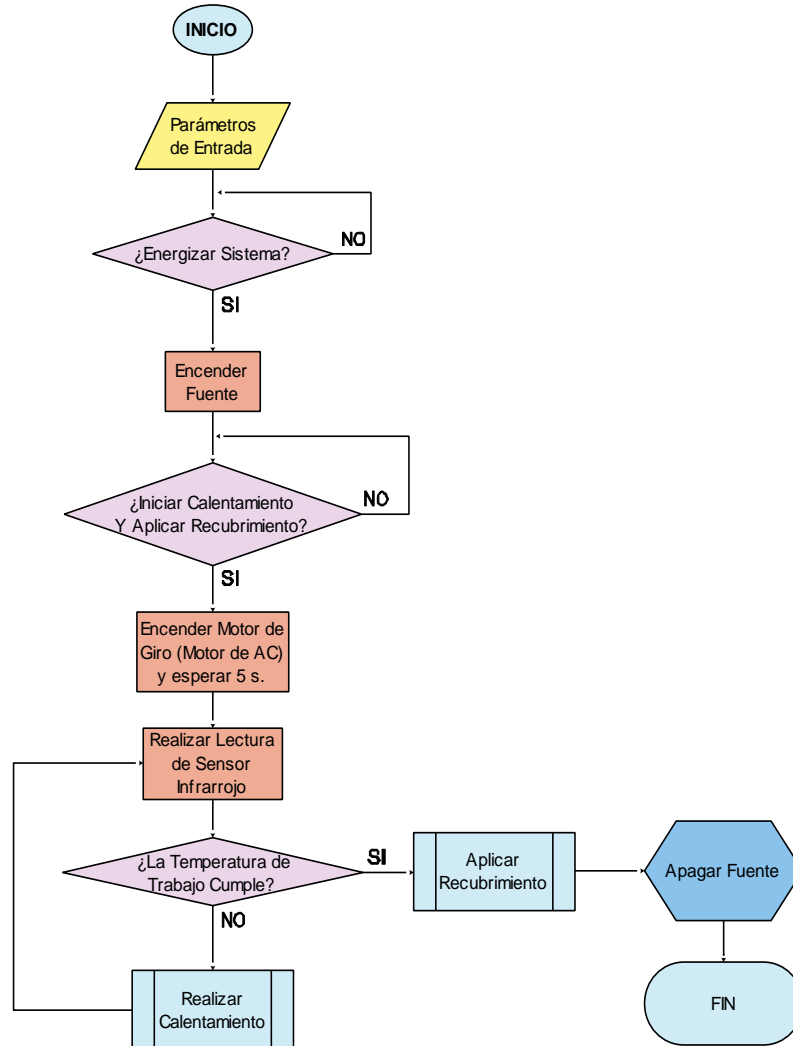
Se realizó una programación independiente en caso de ser necesaria la prueba o análisis de un proceso específico para ello se tiene en cuenta las variables que intervienen el desarrollo y continuidad, entre ellas se encuentran trabajo con calentamiento y trabajo sin

<sup>24</sup> Roncancio, Henry. Tutorial de labview. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Laboratorio de Electrónica. 2001



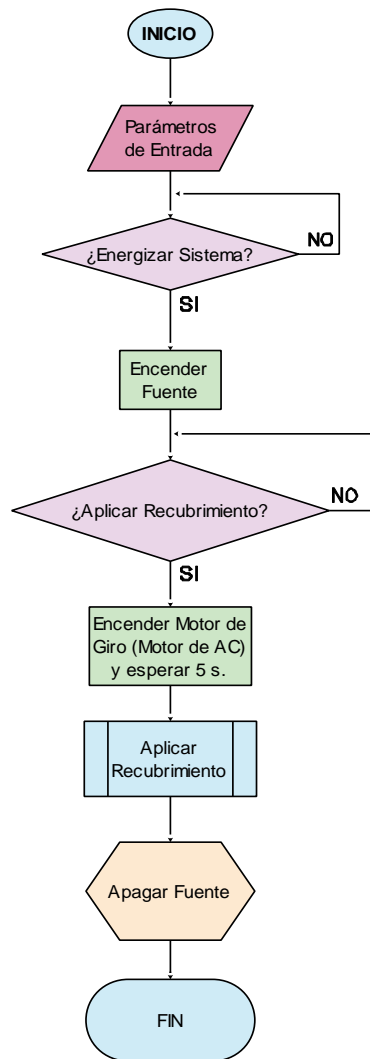
calentamiento, los diagramas de flujo correspondientes se encuentran en las figuras 4-12 y 4-13.

Figura. 4-12 Diagrama de flujo para trabajo con calentamiento



Fuente: los autores

Figura. 4-13 Diagrama de flujo para trabajo sin calentamiento



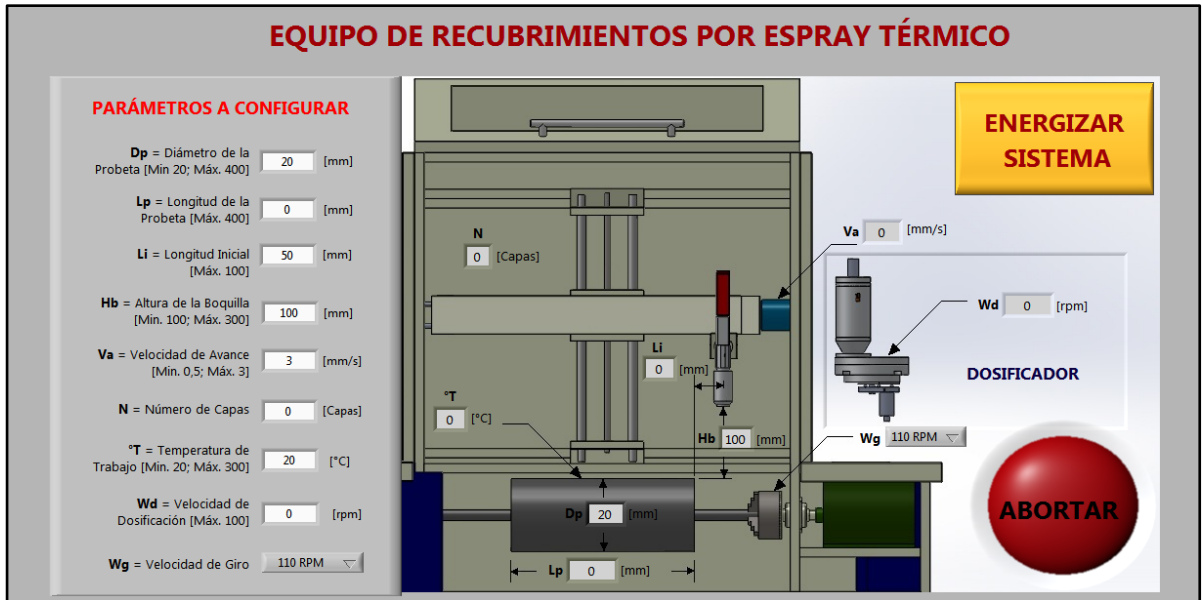
Fuente: los autores

#### 4.8 INTERFAZ GRÁFICA

Las condiciones de operación del equipo de recubrimiento requerían una programación secuencial donde las acciones se ordenan en una estricta sucesión, en relación a esto se programaron las etapas de trabajo dónde se realiza un seguimiento a medida que éstas se activan. Para ello se creó una interfaz hombre-máquina SCADA que responde a las

necesidades de control por parte de un usuario que puede o no tener conocimientos de programación pero puede manipularla con facilidad, mostrada en la figura 4-14.

Figura. 4-14 Elementos del sistema de dosificación

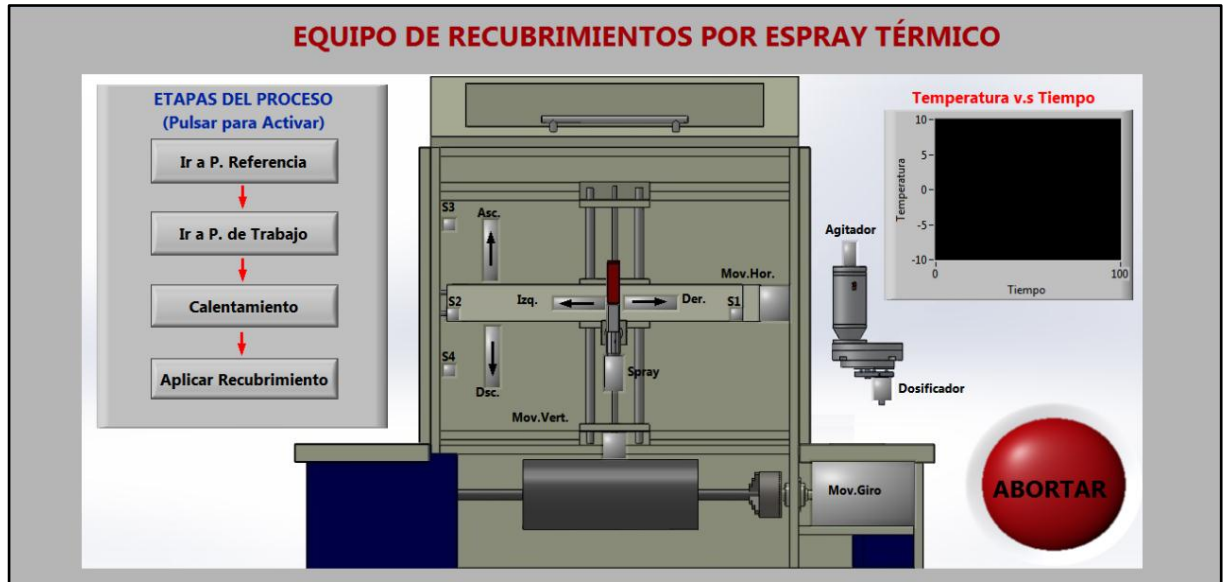


Fuente: los autores

Para la creación de la interfaz se utilizó la estructura TAB CONTROL el cual consta de pestañas que se ejecutan de forma ordenada, en la primera pestaña se crea la interfaz para el control de los parámetros que definen las características del recubrimiento, esta interfaz consta de una imagen basada en el modelo donde se indica cada parámetro que constituye el equipo.

La interfaz hombre-máquina le proporciona al operador las funciones de control y supervisión del equipo. Cada vez que una etapa está ejecutándose, se diferencian los gráficos que representan el proceso, es decir la información se proporciona por medio de paneles de control con señales luminosas como se muestra en la figura 4-15.


Figura. 4-15 Interfaz para el equipo de recubrimiento

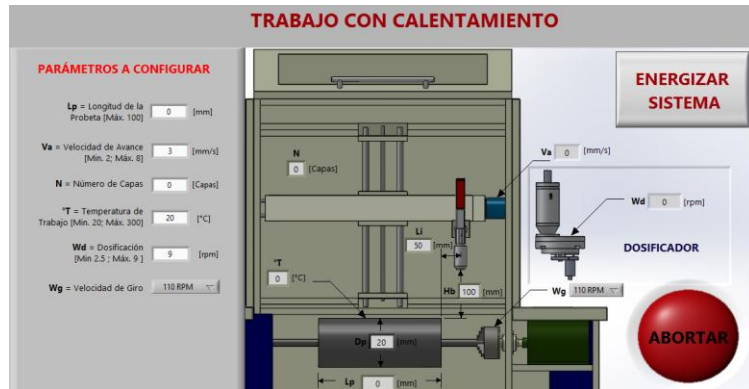


Fuente: los autores

Se realizó una programación específica para cada etapa, sin integración. En el panel frontal se encuentran los controles que permiten la salida y entrada de datos de tipo numérico, booleano, string entre otros que presentan las opciones para darle un valor al programa. En la tabla 4-2 se muestran los Sub Vis individuales descritos.

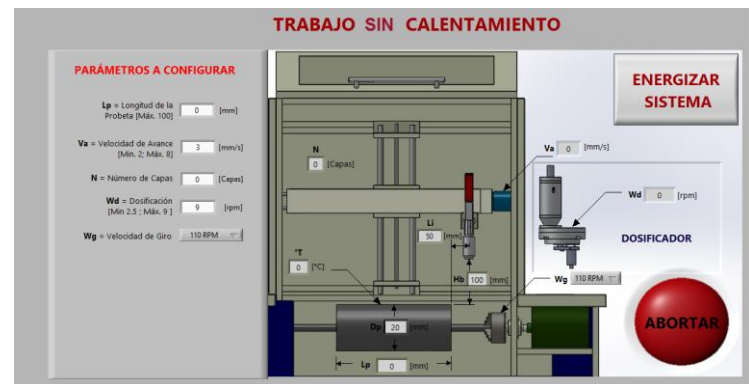
Tabla 4-2 Sub Vis implementados

PANEL FRONTAL	DESCRIPCIÓN
	<p><b>Posición de referencia</b></p> <p>Inicialmente se energiza, va a posición de referencia y en caso de emergencia se encuentra dispuesto el botón de abortar. Para este Sub Vi se utilizó ciclos de tipo <i>while loop</i> que permite la ejecución de una secuencia de instrucciones hasta cierta condición.</p>
	<p><b>Posición de trabajo</b></p> <p>Para el trabajo se energiza el sistema, luego se introducen datos y ejecuta, ir a referencia, una vez cumplida la función se efectúa ir a posición de trabajo, durante este proceso se calcula las constantes necesarias, por medio de nodos de fórmula, tomando los valores que quedaron almacenados en la frontera de entrada, y generando el desplazamiento a posición de trabajo.</p>



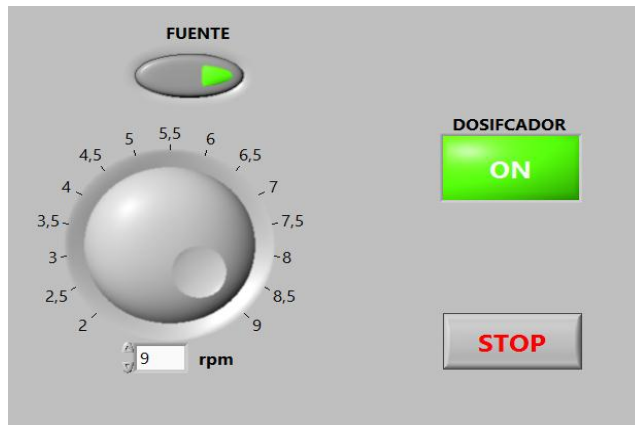
### Trabajo con calentamiento

Para la programación del trabajo con calentamiento se definen los parámetros a configurar en seguida se energiza el sistema luego se ejecuta el calentamiento y trabajo, y en caso de error se pulsa abortar.



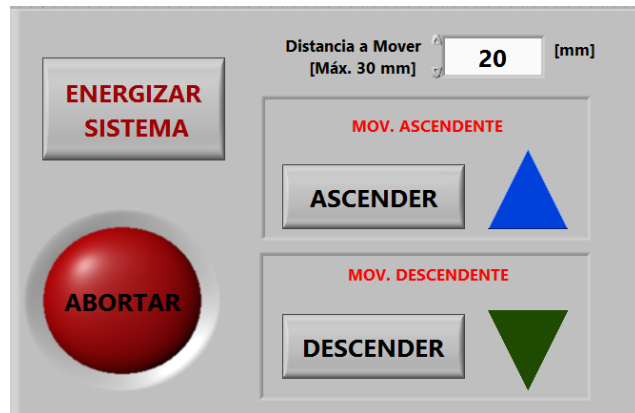
### Trabajo sin calentamiento

A diferencia del anterior una vez energizado el sistema el proceso de aplicación de recubrimiento es ejecutado directamente.



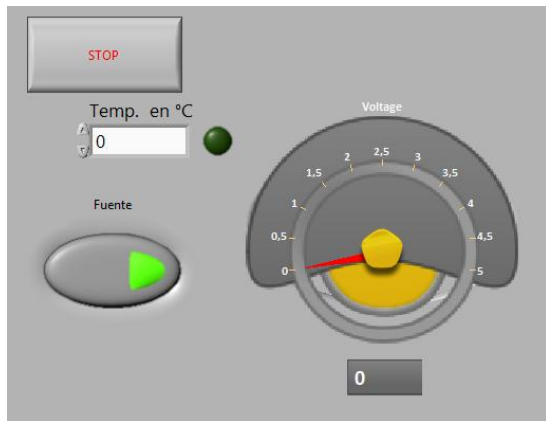
### Dosificación

En la programación de dosificación se tiene en cuenta un control de velocidad para el giro del plato de distribución de polvo, para ello se utiliza una estructura *while loop* que contiene el control de tipo numérico el cual permite establecer las revoluciones a las que el elemento va a girar y a su vez contiene un subdiagrama con un *case structure* dónde se encuentran más datos de diferente tipo que permiten la ejecución de la codificación indicada. En el panel frontal se encuentra el pulsador que se encarga de detener el sistema, además de encender fuente y dosificador.



### Movimiento Vertical

Primero se energiza el sistema en el movimiento vertical se define la distancia a mover y se indica la posición de ascenso-descenso con un nodo de fórmula donde se tiene en cuenta la altura de trabajo, para ello se ubican como referencia los sensores superior e inferior.



### Sensor de temperatura

Para establecer la temperatura del recubrimiento, se tiene un sensor que permite detectarla a través de una lectura análoga, que toma datos de tensión los cuales son proporcionales a la temperatura. En el panel frontal se muestra los botones indicadores y pulsadores que definen el proceso.



### Movimiento horizontal

Para el movimiento horizontal se realiza el desplazamiento de la antorcha de acuerdo a la distancia a mover que máximo es 500mm. Hay la posibilidad de elegir el sentido de desplazamiento por medio las flechas dispuestas en el panel frontal. En la programación de las estructuras para este movimiento se tienen en cuenta los sensores fin de curso.

Fuente: los autores



## **5. IMPLEMENTACIÓN**

La implementación del equipo de recubrimiento por spray térmico se realizó teniendo en cuenta el diseño descrito en los capítulos anteriores que integra el sistema mecánico, el electrónico y el sistema de dosificación.

La validación del funcionamiento se hizo a través de la aplicación de recubrimientos, efectuando el ciclo requerido para que la pieza sometida cumpla con las especificaciones necesarias, se inicia con la comunicación entre la tarjeta de control y la interfaz que retroalimenta los datos fijados, dando paso a la activación de motores para la etapa de posicionamiento luego su desplazamiento a la posición de trabajo previamente programada y su retorno a posición de referencia después de realizar el recubrimiento.

### **5.1 SISTEMA MECÁNICO IMPLEMENTADO**

Teniendo como base los diseños estructurales y planos para el ensamble del sistema mecánico se inició con la construcción de partes y articulación de la estructura o carcasa; se hicieron los ajustes finales y verificación antes de iniciar el ensamble del equipo de recubrimiento. Establecidas las posiciones para cada sistema se realizó el ajuste de los ejes horizontal y vertical con los elementos previamente determinados, utilizando materiales en bronce, acero, aluminio entre otros, para componentes requeridos como bujes, platinas de soporte, elementos protectores etc.

El ensamble del conjunto interno se realizó en el laboratorio de soldadura de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-Uptc, que cuenta con elementos que facilitaron la construcción del equipo final.

Piezas que requerían tolerancias precisas se construyeron en el Control Numérico computarizado CNC de la Uptc. Otras piezas con características especiales se fabricaron en un taller industrial.

Se utilizaron herramientas como taladro manual y de banco, pulidora, esmeril, moto tool, remachadora, prensas, limas, limadora, equipo de pintura, compresor y el equipo de soldadura para realizar las uniones metálicas en diversos puntos de apoyo. Para la sujeción de algunos elementos se utilizaron resinas epóxicas y adhesivos especiales como sikaflex. La condición medioambiental del equipo requería pensar en elementos de protección para los mecanismos ensamblados, con el fin de evitar la contaminación en rodamientos y partes internas de las piezas fabricadas, causadas por el polvo; se implementó un protector para los ejes horizontal y vertical como se muestra en la figura 5-1, además de estructuras metálicas para la protección de los rodamientos ubicados en la parte final de los ejes horizontal y vertical.

Figura. 5-1 Sistemas horizontal y vertical implementado



Fuente: los autores

### 5.1.1 Carcasa

La carcasa fue ensamblada en la Dobladora Industrial dado que la precisión de acople entre las láminas necesitaba trabajo profesional, la unión con soldadura en gran parte de la carcasa garantiza rigidez y estabilidad a la estructura; esto se llevó a cabo con los planos y el apoyo de los autores. Se reforzaron puntos de apoyo debido a la ubicación de componentes como el soporte para ubicación de la tapa frontal. En la figura 5-2 se muestra la carcasa fabricada.

Figura. 5-2 Fabricación de la carcasa



Fuente: los autores

### 5.1.2 Sistema horizontal implementado

En la implementación del sistema horizontal se utilizaron rodamientos de una hilera de bolas en los extremos de los ejes, estos soportan la carga y la distribuyen de manera uniforme, y apoyos para asegurar el enlace móvil de varios mecanismos que hacen

parte del conjunto como la plataforma encargada de soportar los dos sistemas, ubicada en la carcasa; garantizando la precisión y mínimo rozamiento para un correcto desplazamiento de los sistemas ensamblados, en la figura 5-3 se visualiza el ensamble del sistema horizontal.

Figura. 5-3 Sistema horizontal implementado



Fuente: los autores

### 5.1.3 Sistema vertical implementado

El uso de máquinas-herramienta como torno convencional, CNC y fresadora, permitieron el desarrollo de gran parte de los elementos implementados en el equipo, como algunas de las partes del sistema vertical, mecanismos de sujeción como platinas de soporte para resistir el peso del sistema y el maquinado de ejes, entre otros.

En piezas que era necesario una inclinación particular, se utilizó la dobladora manual, que permitió realizar geometrías especiales en algunas cavidades, de modo que las piezas cumplan con los requerimientos inicialmente diseñados.

En la figura 5-4 se muestra el ensamble inicial y la ubicación final con los elementos diseñados, dónde se describe el diseño para su respectiva implementación.

Figura. 5-4 Verificación de planos del equipo de recubrimiento



Fuente: los autores

#### 5.1.4 Disposiciones generales

El ensamble sistema de giro inicio con la unión de la base triangular y la copa, de forma paralela se realizó el acople entre el motor y el mecanismo piñon-cadena para hacer la unión final y ubicación en la plataforma dispuesta para el sistema.

De acuerdo a la caracterización del equipo después de su ensamble exterior, inicio la etapa de pintura y pulido que le dio un terminado individual a toda la estructura como se muestra en la figura 5-5, en seguida, se ensamblaron los ejes horizontal y vertical teniendo en cuenta tolerancias, ajustes y medidas para ubicación exacta.

Teniendo en cuenta el orden de trabajo para el ensamble del equipo, y en relación a las prioridades de construcción se iban acoplando los sistemas y articulando piezas y elementos en cada uno; así la planificación de trabajo facilitó el desarrollo de la máquina.

Figura. 5-5 Terminado de la estructura exterior



Fuente: los autores

El ensamble de la máquina se detalla en el Anexo A donde se presentan los planos describiendo conjuntos y subconjuntos. En la figura 5-6 se visualiza el equipo renderizado y la implementación.

Figura. 5-6 A la izquierda equipo simulado, a la derecha implementado.



Fuente: los autores

### 5.1.5 Pruebas al sistema de posicionamiento

Se realizaron las pruebas al sistema horizontal para determinar el tiempo de recorrido de la antorcha, gracias a esto se determinaron los siguientes valores:

Tabla 5-1 Datos de desplazamiento de la antorcha en el eje horizontal

Distancia (cm)	Tiempo (s)
10	14
30	17
60	23
120	44
240	86

Fuente: los autores

## 5.2 ENSAMBLE DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

Teniendo en cuenta las especificaciones dadas en el capítulo 3 acerca del diseño del sistema electrónico donde se establecen los circuitos y elementos necesarios para el control del equipo, sus respectivos caminos de enlace de los circuitos de control y se estableció la disposición de los componentes de acuerdo a características de ubicación.

Se inicia con la impresión de las rutas de conexionado en papel propalcote con las dimensiones requeridas para su ubicación en baquelitas de 10cm x 10cm, se hace la transferencia de los caminos con la ayuda de cartón paja, una prensa manual, y un horno.

Cuando los caminos se encuentran en la baquelita, ésta se sumerge en ácido especial para desprender el cobre sobrante y poder ubicar los componentes perforando los puntos determinados para ellos, en el proceso se buscó pulir cada tarjeta para darle un terminado final, en la figura 5-7 se observa parte del proceso.

Contando con los diseños previos, su posterior impresión y materialización se implementan los componentes requeridos en cada tarjeta, éstos fueron adquiridos en tiendas electrónicas y por pedidos especiales. Cuando se realizó el ensamble de todas las tarjetas, se ubicaron en una tabla de madera con dimensiones especiales para que se acoplara en el compartimento destinado para el sistema electrónico, ésta garantiza el aislamiento del sistema y evita un posible cortocircuito; para fijar cada tarjeta se utilizó tornillos para madera, perfiles de lámina en aluminio y aisladores de caucho para los orificios requeridos en el ensamble.

Figura. 5-7 Fabricación de las tarjetas de control



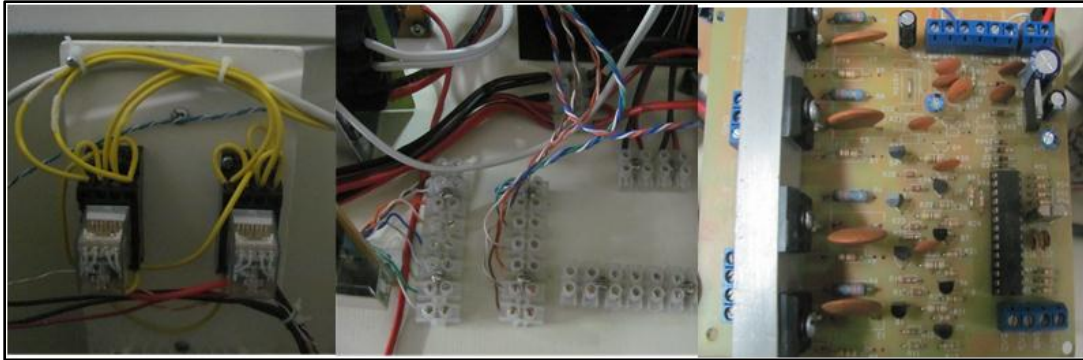
Fuente: los autores

En cuanto al disipador de calor, se situó en la parte derecha del compartimento de control, el soporte de aluminio utilizado para sostener los componentes del disipador ensamblado cuenta con el espacio necesario y estabilidad para su respectivo cableado y fácil ubicación.

En la figura 5-8 se muestra las borneras utilizadas en la conexión de todo el sistema de control, así como los relés, que permite el control de dirección del sistema vertical, ya sea subir o bajar y utilizados para la protección del conjunto y la tarjeta encargada del control del motor paso a paso. La disposición física de los elementos ubicados en la tabla busca la mayor cercanía posible para la conectividad de los elementos y un anclaje confiable. Se utilizó cable de diversos calibres de acuerdo a la función de las partes que debía conectar.



Figura. 5-8 Ubicación de componentes en el compartimento de control



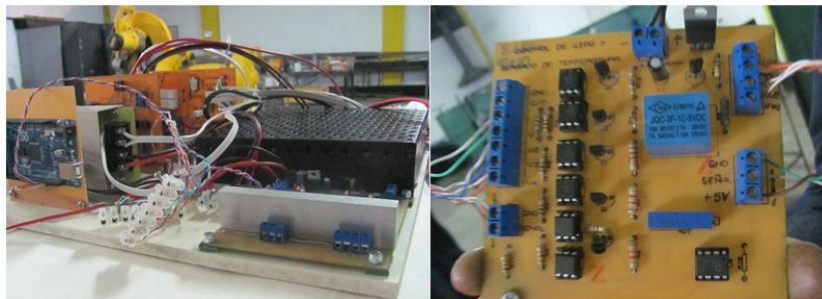
Fuente: los autores

Los fusibles que se utilizaron para la protección del sistema fueron dispuestos en frente del disipador de potencia en caso de falla, si esto ocurre, estos se romperán pero la composición del sistema de control permanecerá estable.

La disposición de los elementos electrónicos se realizó de tal manera que fuera posible una conexión segura y lo más directa posible con la tarjeta de control arduino Mega, ubicando entradas en un extremo y salidas en otro, cada tarjeta se encuentra señalizada por su nombre respectivo permitiendo una fácil identificación de su función en el sistema de control y reconocimiento en caso de un posible mantenimiento.

En la figura 5-9 se muestra el ensamble del sistema de control, que incluyen tarjetas, fuentes y elementos electrónicos con sus respectivas conexiones.

Figura. 5-9 Ensamble general del sistema electrónico



Fuente: los autores

### 5.3 ENSAMBLE DEL SISTEMA DE GIRO

Teniendo en cuenta los elementos previamente diseñados para el sistema de giro, se realiza la articulación de los componentes fabricados y adquiridos, el uso de un soporte metálico como base facilita el anclaje del motor de corriente alterna, la base cuadrangular y la copa; con el fin de lograr la altura necesaria para centrar a punto el sistema se utilizó una lámina de madera de 2cm de altura, de tal manera que también soportara la base y

facilitara el anclaje al soporte. En la figura 5-10 se visualiza en ensamble de partes del sistema de giro. Se utilizaron prensas manuales y tubos de prueba para establecer el punto específico de ubicación del conjunto.

Figura. 5-10 Ensamble del sistema de giro



Fuente: los autores

El uso de pintura anticorrosiva en diferentes elementos del sistema de giro, garantizan una protección completa en partes sometidas a ambientes que pueden llegar a degradarlas. Se utilizaron aisladores para proteger los rodamientos evitando el contacto con polvo y un posible daño. En la conexión del motor de corriente alterna se requería un aislamiento por lo que los cables se desplazaron, de manera que se evitara el contacto con elementos que pudieran generar conflicto.

#### 5.4 ENSAMBLE DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

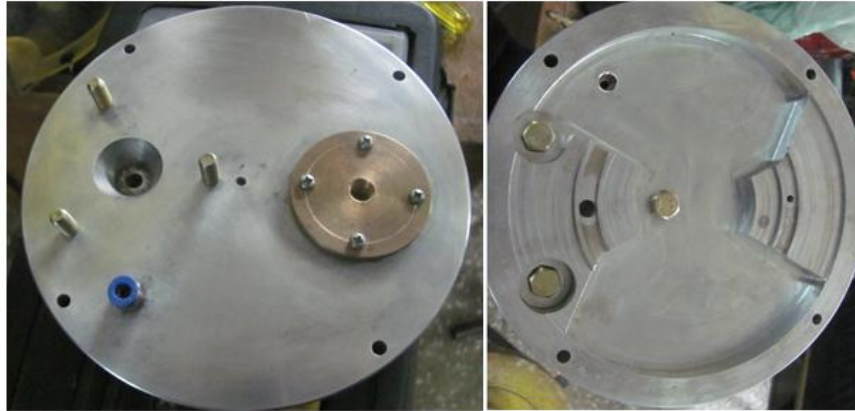
La mayor parte de las piezas requeridas en el ensamble del dosificador fueron fabricadas en el control numérico computarizado debido a ranuras, cavidades y mecanizados que no era posible realizar en máquinas-herramienta convencionales; el material utilizado en gran parte del sistema de dosificación fue aluminio, ventajas como un menor peso y facilidad para maquinar, hicieron que éste material fuera elegido para realizar el sistema de dosificación.

En la figura 5-11 se muestra la tapa superior del dosificador y las partes utilizadas para el anclaje del mismo, se encuentran los elementos adicionales necesarios para que sea



posible un flujo de polvo constante y ajustado, como el elemento en bronce mostrado a la izquierda.

Figura. 5-11 Tapa superior implementada



Fuente: los autores

En la figura 5-12 se muestra la tapa inferior con el plato y un retenedor fabricado en caucho de características especiales para evitar un posible escape de aire. El plato dosificador se fabricó en teflón permitiéndole mayor ajuste en el momento del ensamble completo. Teniendo en cuenta que las piezas están fabricadas con dimensiones exactas el ajuste y tolerancia de las mismas permiten un conjunto con características precisas para su correcto funcionamiento.

Figura. 5-12 Tapa inferior implementada



Fuente: los autores

En la implementación de la tolva se realizó el acople entre el agitador y la tapa como se muestra en la figura 6-13, para esto se utilizó un buje de acero hecho a la medida, para articularlo a la tapa y al motor sin crear ningún conflicto con los demás componentes, el uso de prisioneros facilitó el ajuste completo, teniendo previsto el movimiento constante del motor. Para el ingreso de polvo la tapa del sistema tiene un orificio tal como se describió anteriormente, además de un terminado especial en la parte baja para que el flujo de polvo filtre de manera constante.

Debido a que el motor se encontraba expuesto, fue necesario implementar un mecanismo de protección que garantizara el funcionamiento correcto sin interferencias, para ello se fabricó un protector en PVC que aísla el mecanismo interno y su conexión.

En la figura 5-13 se muestra los elementos del dosificador ensamblados y su ubicación en el soporte encargado de sostener el sistema; fue necesario el uso de un retenedor protector para lograr un ajuste exacto entre la tolva y la tapa superior, también fue necesario implementar un soporte para el motor encargado del movimiento plato.

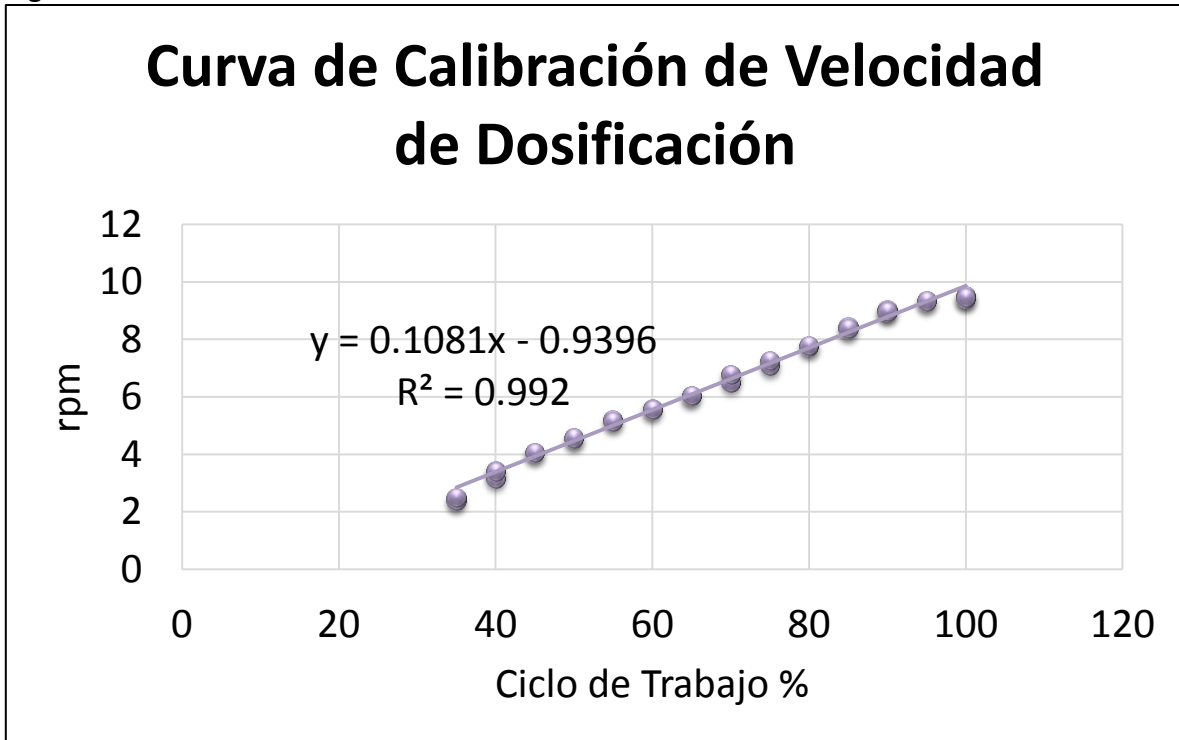
Figura. 5-13 Tolva implementada



Fuente: los autores

Una vez implementado el dosificador, se realizó un estudio del movimiento, en el cual se evaluaron los parámetros de entrada y de salida obteniendo una curva de calibración como la indicada en la figura 5-14, en el cual se puede observar un movimiento lineal con respecto al porcentaje del ciclo de trabajo (PWM) del motor del plato dosificador.

Figura. 5-14 Curva de Calibración de Velocidad de Dosificación.



Fuente: Los autores.

## 6. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó un equipo de recubrimiento por spray térmico que toma como base un sistema cartesiano tridimensional, y se ajusta a los criterios de diseño y necesidades del Instituto para la para la investigación e innovación en ciencia y tecnología de materiales - INCITEMA.

El diseño e implementación del equipo de recubrimiento por spray térmico se convierte en un referente teórico-práctico para el desarrollo de nuevos proyectos basados en posicionamiento tridimensional con gran precisión, software para control de procesos en tiempo real, y obtención de recubrimientos con datos medibles y verificables.

Se diseñó e implementó un sistema de dosificación que atiende a las necesidades de entrega de polvo requerido en el recubrimiento por proyección térmica, respondiendo a las señales de activación y dosificación de material de aporte en el tiempo y cantidad requerido.

La interfaz hombre-máquina creada permite el procesamiento de datos, la retroalimentación de los mismos y señales emitidas en tiempo real para las especificaciones y características del recubrimiento realizado.

El proyecto de diseño y construcción de un equipo de recubrimiento, permite una consolidación de todas las bases del conocimiento en la que se garantiza que las estrategias desarrolladas desde la Uptc, sirven a la industria y brindan apoyo a la misma.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda que para la utilización del equipo se sigan los manuales de operación y mantenimiento anexos al presente informe.
- Extender la base de conocimientos obtenidas al diseño e implementación de otros sistemas automatizados de movimiento en el espacio.
- Plantear una metodología de optimización para establecer el punto óptimo de desempeño del equipo en función del tipo de los tipos de recubrimiento a utilizar.

## BIBLIOGRAFIA

ABELLO, Linde. Proyección térmica de superficies, Linspray. España. 2002.

ANTIQUERA, J. VALENCIA, E. Caracterización microestructural y propiedades mecánicas de recubrimientos por metalizado. Congreso conamet/sam 2004.

BANZI, M, et al. Arduino Mega 2560. [Online] 2012. <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>.

BRALO, Acabado superficial y recubrimientos de protección. [Online] 2011. <http://www.bralo.com/es/informacion/informacion-tecnica-en-general/acabado-superficial-y-recubrimientos-de-proteccion>

CASTELLANOS, Laura. Resistencia a la corrosión en recubrimientos comerciales Metaceram 25050 y Proxon 21071 producidos con el sistema de proyección térmica por llama. Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Mecánica: Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, 2011.

CHANG, T., WYSK, A., y WANG, H. Computer-Aided Manufacturing. New Jersey: Second Edition, Prentice Hall. 1998.

CHANGOLUISA, C.E. y HERRERA, X.V. Diseño y Construcción de un Prototipo de Torno Automático Mediante Control Numérico Computarizado CNC, Proyecto de grado para la optar al Título de Ingeniero Electromecánico. 2007. Escuela Superior Politécnica Del Ejército Sede-Latacunga.

Equipos de abrasión. [Online] 2009. <http://equiposdeabrasion.com.mx/PrgsvSyTr.php/>.

EURO INOX. Decapado y pasivado del acero inoxidable. Serie Materiales y sus aplicaciones. 2004. vol 4. ISBN No. 2-87997-133-0

FLOREZ, M.E. y RUIZ J. Recubrimientos y tratamientos superficiales. Asociación técnica española de galvanización. España. 2007

GAONA, Mireia. Recubrimientos biocompatibles obtenidos por Proyección Térmica y estudio in vitro de la función osteoblástica. Trabajo de grado presentada para optar al título de Ciencias químicas. Universidad de Barcelona. Departamento de ciencia de los materiales e Ingeniería Metalúrgica, 2007. 13 p.

Isue, A. Double or Single Powder Feeder type FTS-10 or FTS-20. [Online] 2010 <http://www.fst.nl/products/systems/powders-feeders/fst-10-20>

Ledezma, Filemon. Labview-arduino [Online] 2009. <http://es.slideshare.net/FilemonLedezmaAlmendras/arduino-lab-view-15963313>

LOU, Yunjiang. ZHANG, Dongjun. LI, Zexiang. Optimal design of a parallel machine based on multiple criteria. En: International conference on robotics and automation. Proceedings of the 2005 IEEE.

Martín, Aldemar. MODELAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DE ALTA VELOCIDAD CON MOTOR LINEAL. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería mecánica. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2009.

MOTT, R. Diseño de elementos de máquinas. Mexico. Cuarta Edición, Prentice Hall. 2006.

MURIMI, E. KIHU, J. Nyakoe G. MUTULI, S. A survey of ultrasonic waves in powder transportation. 2012

NIASA. Actuadores lineales electromecánicos y soportes de husillo. [Online] 2010. <http://www.niasa.es/backend/catalogos/2010R1NIASAC2ACTUADORESLINEALESELECTROMECANICOS.pdf>

RESTREPO, E. VARGAS, F. LOPEZ, M. CARDONA, R. DUARTE, G. Elaboración de recubrimientos cerámicos mediante proyección térmica por combustión a partir de residuos sólidos industriales. Colombia. 2012. p. 1178. Revista Materia. ISSN 1517-7076

Roncancio, Henry. Tutorial de labview. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Laboratorio de Electrónica. 2001.

Sonkyo, Tratamientos superficiales. [Online] <http://www.sonkyosp.com/importacion-piezas-metalicas/tratamientos-superficiales>.

TORRES, E. LEON, J. TORRES, E. DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electromecánico. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Escuela de Ingeniería electromecánica. 2013

Sulzer, Metco. Thermal Spray Equipment guide. [Online] 2010. [http://www.jya.cl/wp-content/uploads/2013/02/Equipment\\_Guide\\_EN8\\_web.pdf](http://www.jya.cl/wp-content/uploads/2013/02/Equipment_Guide_EN8_web.pdf)

VÉLEZ, Hernando. RECUBRIMIENTOS DE 560 AS PRODUCIDOS CON EL SISTEMA DE PROYECCIÓN TÉRMICA POR ARCO. Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Mecánica: Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Mecánica, 2013.



# **ANEXO A**

## **PLANOS DEL SISTEMA MECÁNICO**

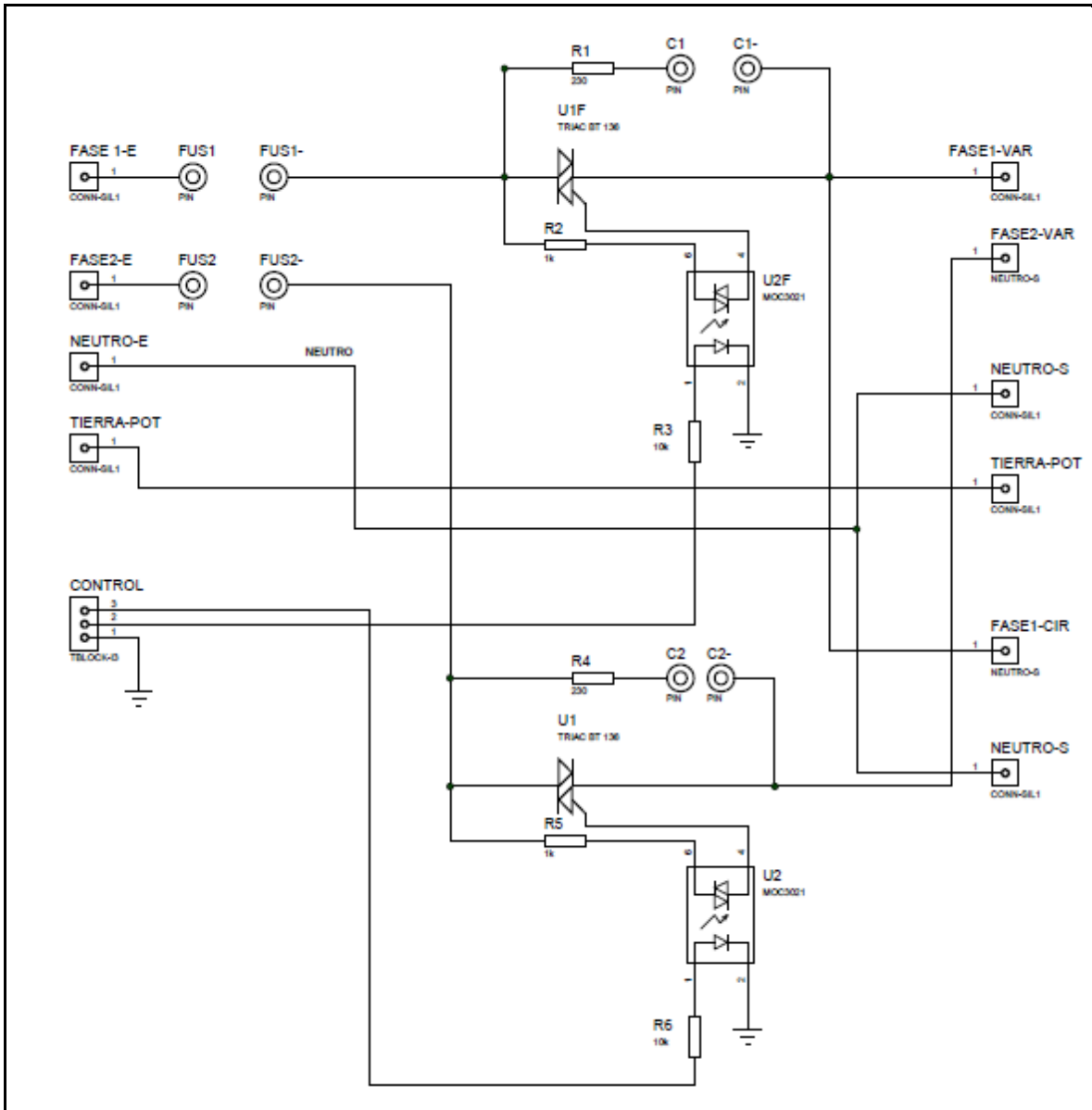
Explosionado (Planos Adjuntos)

Detalle por pieza (En medio magnético)

# **ANEXO B**

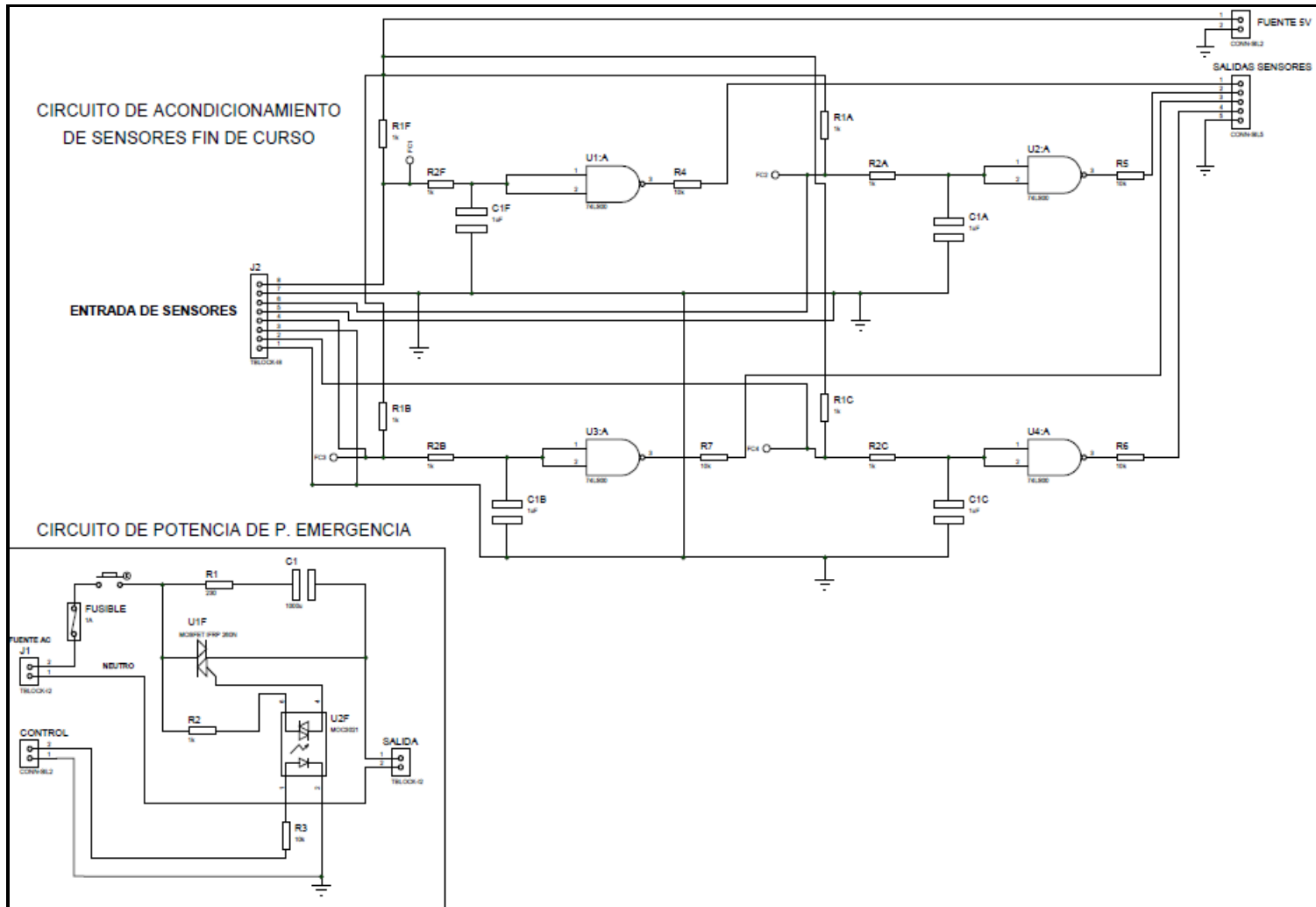
**PLANOS DEL SISTEMA ELECTRÓNICO  
ESQUEMAS**

## 1. Circuito de encendido del equipo de recubrimiento por spray térmico



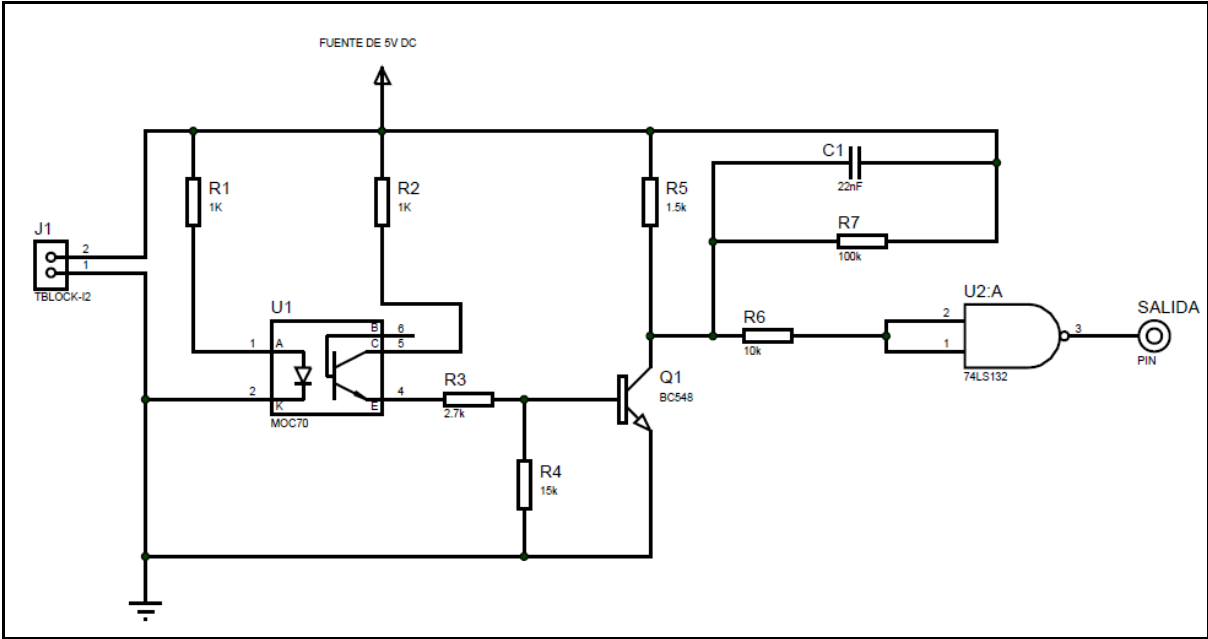
Fuente: Los Autores

## 2. Circuito para apagado de emergencia y acondicionamiento de sensores del equipo de recubrimiento.



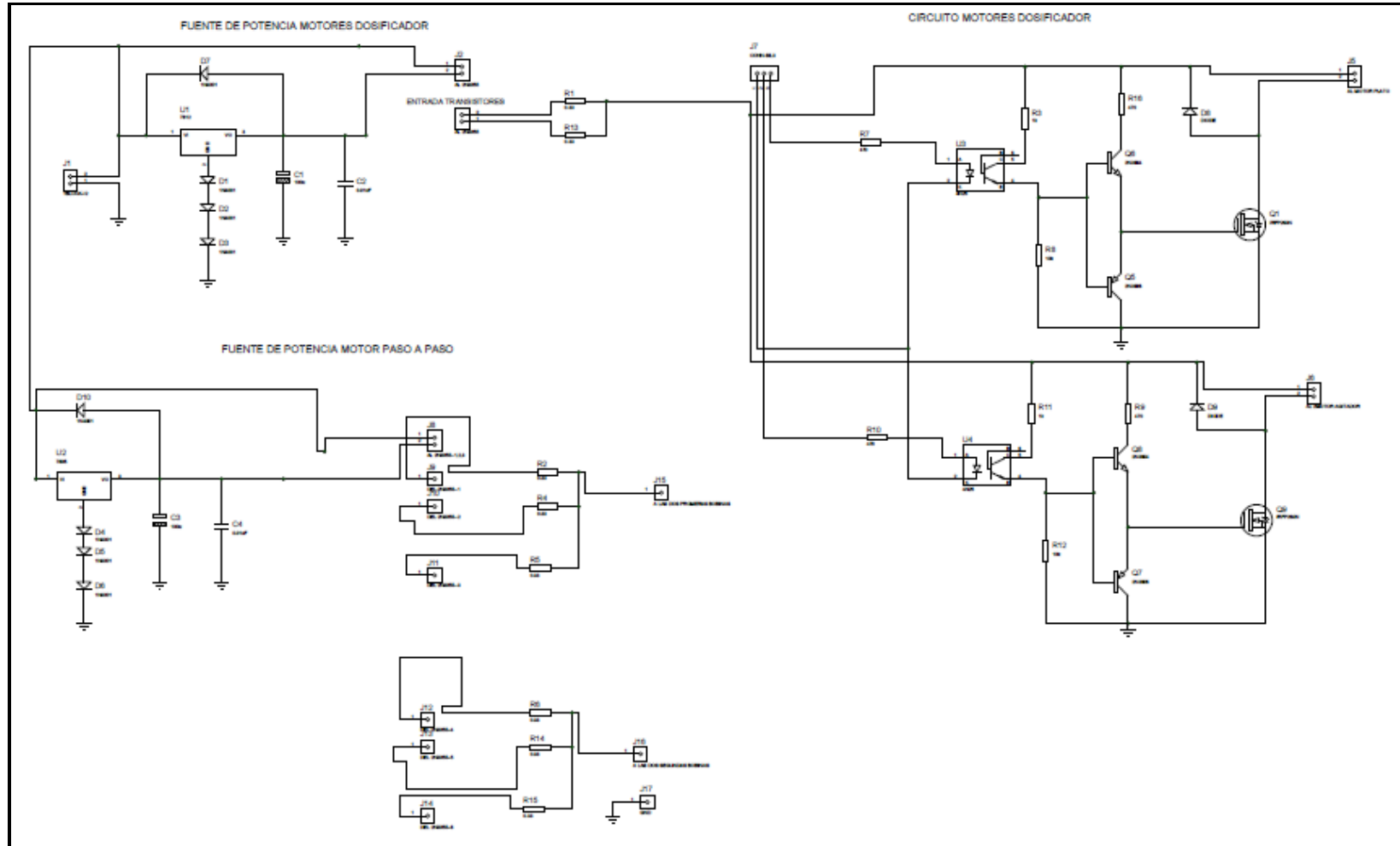
Fuente: Los Autores

### 3. Encoder de posicionamiento para el eje vertical



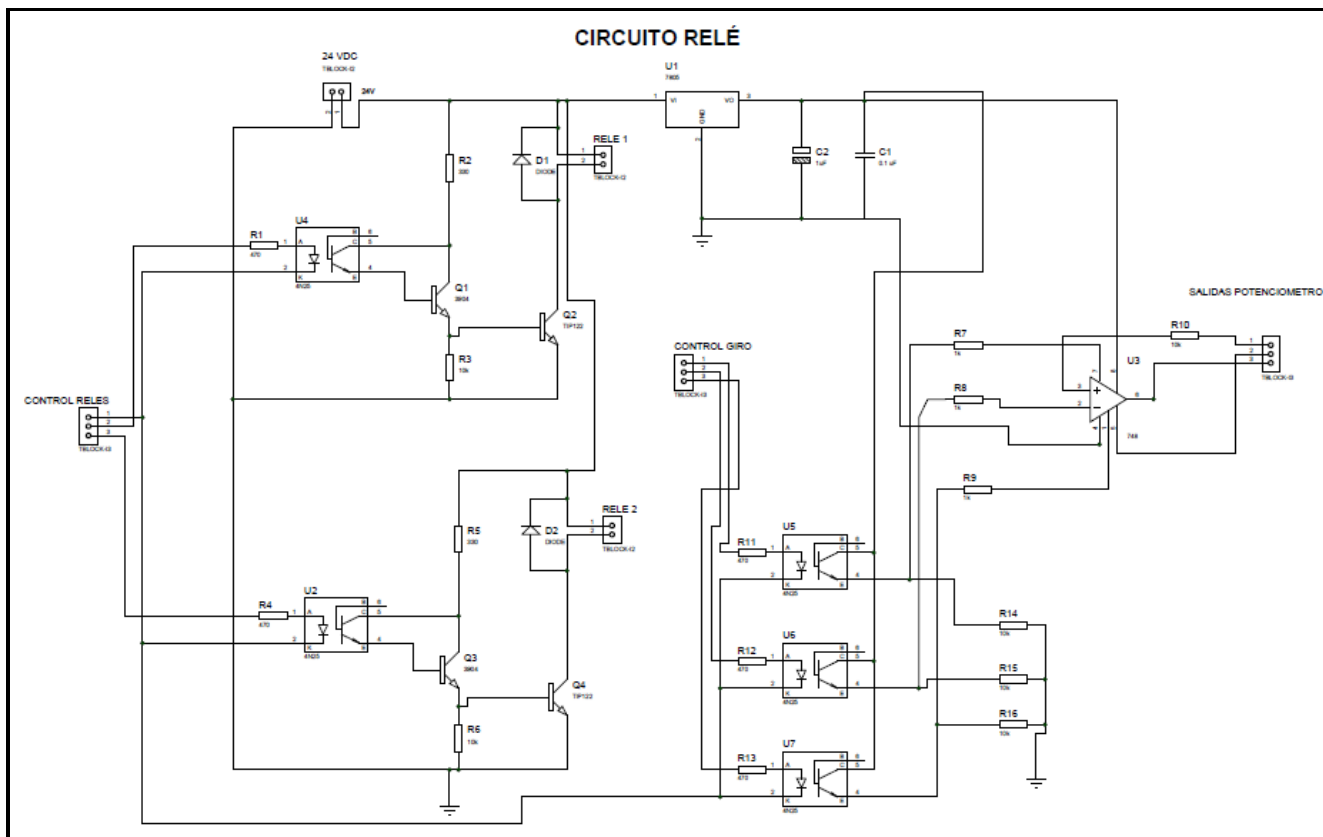
Fuentes: Los Autores

#### 4. Fuentes de potencia para motor paso a paso y dosificador



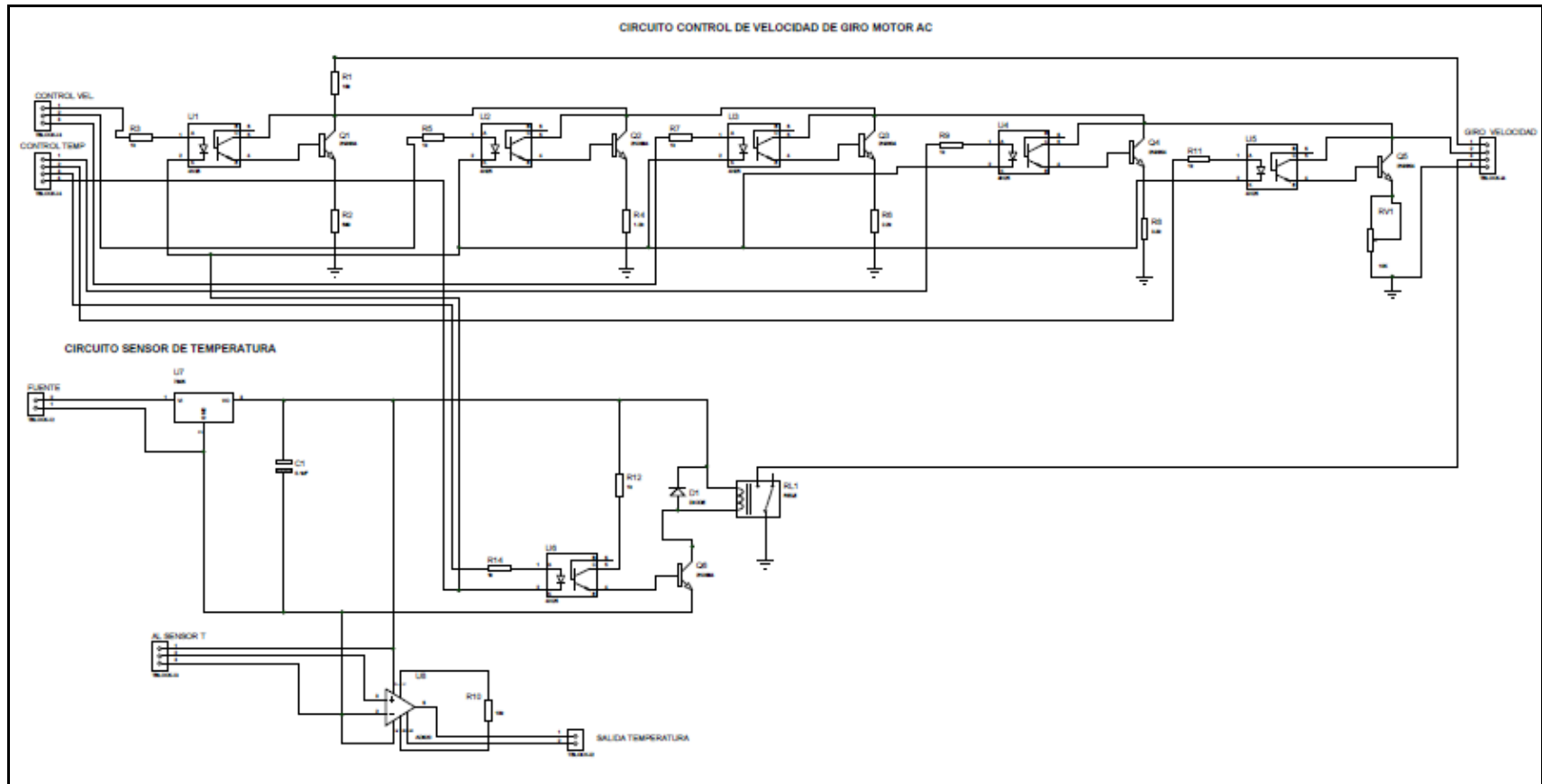
Fuente: Los Autores

## 5. Circuito de control para el movimiento vertical



Fuentes: Los Autores

## 6. Circuito de control para el control del movimiento de giro



Fuente: Los Autores



# **ANEXO C**

**MANUAL DE OPERACIÓN (En Medio Magnético)**

# **ANEXO D**

**FOTOS DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN (En Medio Magnético)**