



UNIVERSIDAD DE TALCA.

FACULTAD DE INGENIERÍA.

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECATRÓNICA.

DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE
PULVERIZACIÓN PARA RECUBRIMIENTOS
SUPERFICIALES EN PANELES
FOTOVOLTAICOS.

Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil en Mecatrónica.

Profesor Guía:

Dr. Cristóbal Montalba Weisse.

JORGE ENRIQUE CORREA OYARCE.

Curicó-Chile

2020

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



UNIVERSIDAD DE TALCA
DIRECCIÓN
SISTEMA DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD DE TALCA
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
CAMPUS CURICO

Curicó, 2022

Dedicatoria.

... Dedicado a mis padres, pareja e hija, hermanas y sobrinos.

Agradecimientos.

Principalmente agradezco a mis padres, Enrique y Hermosina, por otorgarme un apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Han sido un pilar fundamental en mi crecimiento personal. Gracias por permitir mi desarrollo profesional a pesar de tanto sacrificio. Junto a ellos a mis hermanas Francisca y Lorena.

A Valeria Díaz, mi pareja, por ser un apoyo y testigo crucial de cada esfuerzo y logro que implicó culminar esta etapa de mi vida.

A nuestra hija Leonor, que prontamente vendrá a este mundo.

A mis amigos de toda la vida: Jonathan Torres, Ignacio Muñoz, Víctor Valderrama, Víctor Arancibia y Daniela Huerta, quienes estuvieron siempre presentes alegrando cada día.

A mis amistades formadas en la universidad: Esteban Acevedo, Héctor Ávila, Víctor Miranda, Víctor Vergara y Fernando Contreras con quienes compartí largas horas de estudio y gratos momentos en nuestra época universitaria.

A ellos, mi cariño y agradecimiento eterno.

Resumen.

En este documento se presenta el estudio y diseño de un sistema automático para realizar tratamientos superficiales sobre paneles solares fotovoltaicos. El método de deposición del recubrimiento corresponde a pulverización directa en condiciones ambientales normales (temperatura a 25°C y presión 1 atm), para asegurar un buen acabado en la película protectora

El documento contiene el diseño estructural en el software *Autodesk Inventor 2017* del prototipo, lo que sería un banco de pruebas automático para realizar pulverizado sobre materiales en estudio, principalmente vidrio, material que se utiliza para la fabricación de paneles fotovoltaicos.

Se incluyen cálculos asociados al diseño del sistema, incluyendo simulaciones de esfuerzos y deformaciones sobre materiales utilizados para su fabricación, los ensayos mecánicos se realizaron por medio de software de simulación de *Autodesk Inventor 2017*.

El mecanismo diseñado es controlado con un Arduino UNO conectado mediante puerto serial a una interfaz gráfica desarrollada en Visual Basic, con la finalidad de otorgar simplicidad al usuario al momento de realizar pruebas de laboratorio. Previo al diseño asociado a diferentes aspectos del proyecto, procede la fabricación del prototipo.

La motivación del trabajo se basa en la necesidad de realizar un banco de prueba experimental, esto con el fin de aportar a la investigación del estudio de materiales, específicamente en tratamientos superficiales o manufactura aditiva.

ÍNDICE

1	Introducción.....	12
1.1	Actualidad de energía fotovoltaica en Chile.....	12
1.2	Estado del Arte.....	14
1.2.1	Efectos propios del panel.....	14
1.2.2	Efectos externos al panel.....	16
1.2.3	Métodos de limpieza.....	19
1.2.4	Recubrimientos.....	22
1.3	Objetivos.....	27
1.3.1	Objetivo General.....	27
1.3.2	Objetivos Específicos.....	27
1.4	Alcances y Limitaciones.....	27
1.5	Metodología.....	28
2	Diseño conceptual y alternativas de diseño.....	30
2.1	Análisis de requerimientos.....	30
2.2	Estructura base.....	30
2.2.1	Perfiles de aluminio tipo V-SLOT.....	31
2.2.2	Acero al carbono.....	31
2.2.3	Acero inoxidable.....	32
2.3	Mecanismo de transmisión del pulverizador.....	32
2.3.1	Transmisiones por tornillos sin fin.....	32
2.3.2	Transmisiones con banda sincrónicas y cadenas.....	33
2.4	Tipo de motores eléctricos.....	34
2.4.1	Motor DC.....	34
2.4.2	Motor Paso a paso.....	34
2.5	Sistemas de bombeo de fluidos.....	36
2.5.1	Bombas de desplazamiento positivo.....	36
2.5.2	Bombas cinéticas.....	37
2.5.3	Tanques presurizados hidroneumáticos.....	38
2.6	Tipo de boquillas de aspersión.....	39
3	Diseño detallado mecanismo de pulverizado.....	41
3.1	Descripción del sistema propuesto.....	41
3.2	Selección de boquilla de aspersión.....	44

3.2.1	Capacidad de la boquilla.	44
3.2.2	Gravedad específica.	45
3.2.3	Angulo de aspersión y cobertura.	48
3.2.4	Tamaño de gota.	49
3.2.5	Selección para realizar pedido a fabricante.	50
3.3	Mecanismo de transmisión.	52
3.3.1	Velocidad de avance de un tornillo sin fin.	52
3.3.2	Velocidad de avance de un sistema por correas con poleas gemelas.	53
3.4	Velocidad lineal del pulverizador.	54
3.5	Velocidad máxima del motor.	56
3.6	Selección eje lineal.	57
3.7	Rodamiento lineal.	58
3.7.1	Cálculo de la duración de vida de un rodamiento lineal.	59
3.8	Cálculo de longitud de la correa.	61
3.9	Selección del motor.	63
3.9.1	Carga lineal.	63
3.9.2	Inercia total del sistema.	63
3.9.3	Torque total del sistema.	65
3.10	Sistema de bombeo.	67
3.11	Ensamble del mecanismo transmisión.	71
4	Construcción.	74
4.1	Estructura base.	74
4.1.1	Corte de piezas.	74
4.1.2	Unión de piezas.	75
4.2	Estanque hidroneumático y tapas.	75
4.2.1	Torneado de cilindro para estanque.	76
4.2.2	Corte con plasma de tapa superior.	78
4.2.3	Torneado para superior.	78
4.2.4	Piping para conexión de estanque hidroneumático.	79
4.2.5	Cerradura de tapa superior estanque hidroneumático.	80
5	Instrumentación y control.	81
5.1	Diagrama de instrumentación y proceso.	81
5.2	Diagrama sistema total.	83

5.3	Estrategia de control.....	85
5.4	Lógica de control.....	86
5.5	Programación microcontrolador Arduino.	89
5.6	Interfaz usuario-máquina.	89
6	Puesta en marcha y pruebas experimentales.	90
7	Conclusiones.....	95
7.1	Mejoras y trabajos futuros.....	96
8	Bibliografía.....	97
9	Anexos.....	99
9.1	Planos.	99
9.1.1	Estructura base.	99
9.1.2	Estanque hidroneumático.....	100
9.1.3	Base para motor.....	101
9.1.4	Soporte porta boquilla.	102
9.2	Data sheet.	103
9.2.1	Arduino uno.....	103
9.2.2	Nema 17.	106
9.2.3	TB6600 Stepper motor driver.	110
9.2.4	Driver MOSFET IRF520.	112
9.2.5	Electroválvula solenoide 12 V.	118
9.3	Anexo A. Carta Gantt del plan de trabajo a seguir para la ejecución del proyecto.	122
9.4	Tabla utilizada para realizar cálculos de velocidad lineal de pulverizado.	124
9.5	Diagrama de factor de dureza Fh de ejes lineales.	125
9.6	Influencia de la duración de vida en rodamientos lineales.	126
9.7	Capacidad de carga en rodamientos lineales.....	126
9.8	Códigos.	127
9.8.1	Arduino.....	127
9.8.2	Código interfaz gráfica y comunicación con Arduino, Visual studio 2019. 133	

Lista de ilustraciones.

Ilustración 1: Evolución Capacidad Instalada ERNC Enero 2019. Fuente: Proyectos en Construcción e Inversión en sector Energía a Enero 2019.	13
Ilustración 2: Centrales en construcción Enero 2019. Fuente: Proyectos en Construcción e Inversión en sector Energía a Enero 2019.	13
Ilustración 3: Panel fotovoltaico policristalino.	15
Ilustración 4: Panel fotovoltaico monocristalino.	15
Ilustración 5: Panel fotovoltaico capa fina (amorfos).	16
Ilustración 6: Curva I-V para diferentes niveles de irradiancia [8].	17
Ilustración 7: Curva I-V para diferentes niveles de temperaturas [8].	17
Ilustración 8: curva P-V para diferentes niveles de temperatura [8].	18
Ilustración 9: Limpieza manual de paneles fotovoltaicos. Fuente: www.servia.cl.	20
Ilustración 10: Robot GEKKO Solar remoto. Fuente: www.serbot.ch.	21
Ilustración 11: Sistema de limpieza de paneles fotovoltaicos por rodillos. Fuente: Estación minera.	21
Ilustración 12: Esquema de un proceso de pulverizado con aire. Fuente: CES EduPack 2018.	24
Ilustración 13: Comparación de transmisión óptica en un vidrio recubierto con TiO ₂ y un vidrio natural [16].	25
Ilustración 14: Curva I-V para un PV con tratamiento superficial autolimpiante y otro sin recubrir [16].	26
Ilustración 15: Diagrama de organización para el desarrollo del trabajo.	29
Ilustración 16: Estructura base máquina de recubrimientos. Fuente: Elaboración propia. ...	30
Ilustración 17: Perfil aluminio V-SLOT. Fuente: www.cimech3d.cl	31
Ilustración 18: Perfil Acero A240ES. Fuente: www.sodimac.cl.	31
Ilustración 19: Perfiles acero inoxidable AISI 304. Fuente: www.acerosotero.cl.	32
Ilustración 20: Desplazador lineal por husillo.	33
Ilustración 21: Actuador lineal por correas dentadas.	33
Ilustración 22: Motor DC. Fuente: www.mechatronicstore.cl	34
Ilustración 23: Diagrama motor paso a paso unipolar.	35
Ilustración 24: Diagrama motor paso a paso bipolar.	35
Ilustración 25: Motor Paso a Paso bipolar. Fuente: www.cimech3d.cl.	36
Ilustración 26: Tipo de bombas de desplazamiento positivo. Fuente: Mecánica de fluidos, R. Mott.	37
Ilustración 27: Bombas desplazamiento positivo.	37
Ilustración 28: Tipo de bombas cinéticas. Fuente: Mecánica de fluidos, R. Mott.	38
Ilustración 29: Ejemplo bomba centrífuga.	38
Ilustración 30: Tanques presurizados. Fuente: www.nordson.com.	39
Ilustración 31: Esquema de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.	42
Ilustración 32: Cámara de recubrimientos propuesto. Fuente: Elaboración propia.	42
Ilustración 33: Cámara de recubrimientos propuesto. Fuente: Elaboración propia.	43
Ilustración 34: Cámara de recubrimientos propuesto. Fuente: Elaboración propia.	43
Ilustración 35: Cobertura teórica de aspersion. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.	48

Ilustración 36:Boquillas de aspersion plana, miniatura ProMax Quick Veejet modelo QMVV. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.	50
Ilustración 37: Composición de la boquilla de aspersion. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.	50
Ilustración 38: Datos de la boquilla. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.	52
Ilustración 39: Ejemplo para realizar pedido al proveedor de boquillas. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.	52
Ilustración 40. Código para realizar pedido boquilla seleccionada. Fuente: Elaboración propia.	52
Ilustración 41: Diagrama esquemático sistema transmisión de la boquilla. Fuente: Elaboración propia.	54
Ilustración 42: Polea GT2-60. diámetro eje 8mm.	56
Ilustración 44: Simulación del desplazamiento de un eje con diámetro:8mm, 10mm, 12mm, 16mm con una carga de 2kg en L/2.	58
Ilustración 45: Rodamiento lineal SC16UU. Fuente: www.chimech3d.cl.	59
Ilustración 46: Curva Torque-RPM motor paso a paso Nema 17 MS17HD6P4050. Fuente: www.moonsindustries.eu	67
Ilustración 47: Tanque hidroneumático. Fuente: Elaboración propia.	68
Ilustración 48: Tanque hidroneumático, vista explosionada. Fuente: Elaboración propia.	69
Ilustración 49: Declaración de cargas internas del tanque. Fuente: Elaboración propia.	70
Ilustración 50: Resultado de esfuerzos y deformación, presión interna 3 bar. Fuente: Elaboración propia.	71
Ilustración 51: Mecanismo pulverización propuesto. Fuente: Elaboración propia.	72
Ilustración 52: Mecanismo pulverización propuesto, vista explosionada. Fuente: Elaboración propia.	72
Ilustración 53: Estructura base. Fuente: Fabricación propia.	74
Ilustración 55: Estanque hidroneumático. Fuente: Elaboración propia.	76
Ilustración 56: Torno utilizado para fabricación de estanque hidroneumático. Fuente: Elaboración propia.	77
Ilustración 57: Cilindro refrentado en torno. Fuente: Elaboración propia.	77
Ilustración 58: Tapa superior de estanque cortada por plasma. Fuente: Elaboración propia.	78
Ilustración 59: Tapa superior estanque hidroneumático. Fuente: Elaboración propia.	79
Ilustración 60: Montaje piping en tapa superior. Fuente: Elaboración propia.	80
Ilustración 61: Ilustración 60: Montaje piping en tapa superior. Fuente: Elaboración propia.	80
Ilustración 62: Sistema de cerradura de estanque hidroneumático. Fuente: Elaboración propia.	81
Ilustración 63: Diagrama PI&D de planta de recubrimientos. Fuente: Elaboración propia.	82
Ilustración 64: Driver TB6600 y motor paso a paso Nema 17.	83
Ilustración 65: Diagrama de conexión. Fuente: Elaboración propia.	84
Ilustración 66: Caja estanco, componentes electrónicos y parada de emergencia. Fuente: Elaboración propia.	84
Ilustración 67: Diagrama de bloques planta de recubrimientos. Fuente: Elaboración propia.	88

Ilustración 68: Interfaz gráfica. Fuente: Elaboración propia.....	90
Ilustración 69: Puesta en marcha del sistema. Fuente: Elaboración propia.....	91
Ilustración 70: Puesta en marcha del sistema. Fuente: Elaboración propia.....	92
Ilustración 71: Motor nema 17 montado en planta. Fuente: Elaboración propia.	92
Ilustración 72: Montaje de sistema de transmisión montado en planta. Fuente: Elaboración propia.	93
Ilustración 73: Estanque hidroneumático montado en planta. Fuente: Elaboración propia.	94

Lista de Tablas.

Tabla 1: Funciones de recubrimientos con aplicaciones prácticas. [13]	23
Tabla 2: Tabla de cobertura teórica de aspersion. Fuente: Catálogo 70M Spraying System Co ®.	40
Tabla 3: Tamaño de gota. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.	41
Tabla 4: Factores de capacidad. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.....	45
Tabla 5: Propiedades físicas – químicas AEROXIDE® TiO2 P25. Fuente:[20].....	47
Tabla 6: Propiedades del agua.....	47
Tabla 7: Parámetros para elección de Angulo de boquilla.	48
Tabla 8: Valores de operación de boquilla.	49
Tabla 9: Tamaño de gota. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.	49
Tabla 10: Datos desempeño boquillas. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.	51
Tabla 11: Datos de boquilla seleccionada. Fuente: Elaboración propia.	51
Tabla 12: Distancias sistema de transmisión. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 13: Propiedades de acero inoxidable martensítico 304. Fuente: CES EduPack 2018.	57
Tabla 14: Resultados de deformación máxima en ejes. Fuente: Elaboración propia.	58
Tabla 15: Factor de temperatura. Fuente: www.rodavigo.cl	61
Tabla 16: Valores motor requerido.....	66
Tabla 17: Datos de operación boquilla seleccionada para diseño.	69
Tabla 18: Propiedades físicas acero al carbono SAE1020. Fuente: CES EduPack 2018.....	70
Tabla 19: Elementos del sistema de pulverización propuesto. Fuente: Elaboración propia.	73
Tabla 21: Componentes de diagrama P&ID. Fuente: Elaboración propia.	82
Tabla 22: Componentes del sistema total. Fuente: Elaboración propia.	83
Tabla 23: Velocidades lineales necesarias para el actuador dependientes del espesor seleccionado. Fuente: Elaboración propia.	124

1 Introducción.

El uso de energías renovables no convencionales ha mostrado un impacto en la última década, la finalidad es eliminar fuentes de energía provenientes de combustibles fósiles y así optar por una matriz energética limpia. Una de las opciones más atractivas corresponde a utilizar la energía del sol, debido a que es una fuente limpia y sustentable en el tiempo. Para poder captar la energía solar y transformarla en corriente eléctrica, se utilizan las denominadas celdas fotovoltaicas. Se denominan paneles fotovoltaicos a los arreglos de dichas celdas, los que varían en tamaño y materiales.

Las plantas generadoras de electricidad por medio de paneles fotovoltaicos deben destinar presupuesto para el mantenimiento y limpieza de dichos paneles, con la finalidad de alargar la vida útil y aprovechar al máximo la potencia que éste puede suministrar. El punto más importante en el mantenimiento corresponde a la limpieza del cristal en el panel, que dependiendo de factores medio ambientales (viento, humedad, polvo) pueden llegar a perder hasta un 50% de energía. [1] - [2].

El principal problema en el desempeño energético de las plantas de generación eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos corresponde a la deposición de suciedad sobre el panel. Los granos de polvo, los que varían en tamaño, producen que el área de absorción solar decrezca y así también su potencia. Cabe señalar que las zonas desérticas son las que posiblemente se pueda extraer la mayor cantidad de energía solar, también sean las que poseen mayores índices de suciedad sobre los cristales del panel. Por lo tanto, la finalidad del estudio corresponde a disminuir costos de limpieza y aumentar la vida útil de los paneles instalados por medio de recubrimientos superficiales sobre el cristal del panel, con propiedades auto limpiantes y que a su vez no afecte en el desempeño de dicho componente.

1.1 Actualidad de energía fotovoltaica en Chile.

Chile es el país que posee el nivel de radiación solar directa más alto del planeta, específicamente en el norte del país, esto representa el alto potencial que tiene esta zona en el desarrollo de centrales de generación solar fotovoltaica, específicamente en el Desierto de Atacama.

Cabe señalar que en el año 2013 se dicta la LEY 20.698, la que establece que para el año 2015 el 20% la energía en Chile debe provenir de ERNC (Energías renovables no convencionales), las que incluyen a fuentes eólicas, hidro, biomasa y solar fotovoltaica, éstas han destacado en los últimos años según [3].

A Enero de 2018 la capacidad instalada correspondiente a ERNC alcanza el 20% del total de la matriz energética chilena, equivalente a 4.906 MW, de las que casi el 50% corresponde a energía solar (Ilustración 1).

A su vez al 31 de enero de 2019 existen 31 centrales de generación ERNC en construcción. Estas centrales proyectan un aporte energético de 1.945 MW a la red, de los cuales 376 MW corresponden a energía fotovoltaica (Ilustración 2).

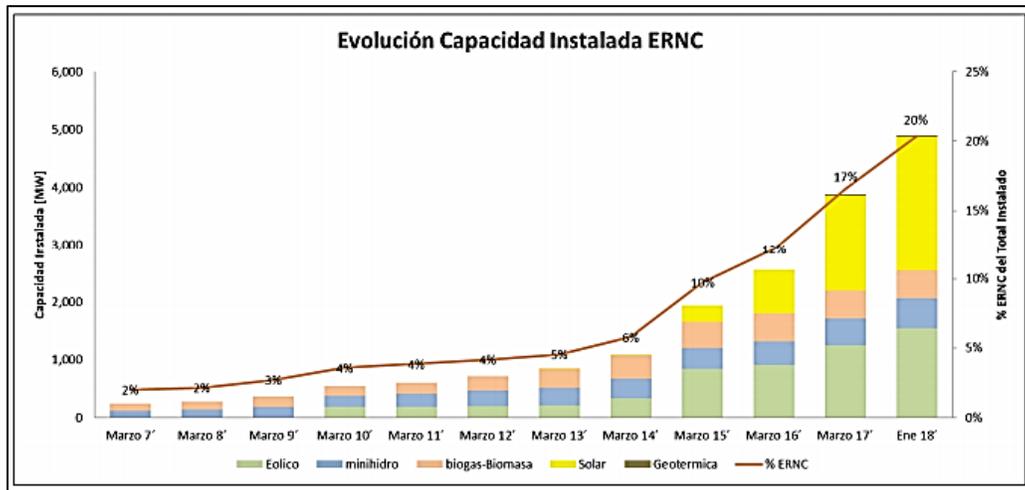


Ilustración 1: Evolución Capacidad Instalada ERNC Enero 2019. Fuente: Proyectos en Construcción e Inversión en sector Energía a Enero 2019.

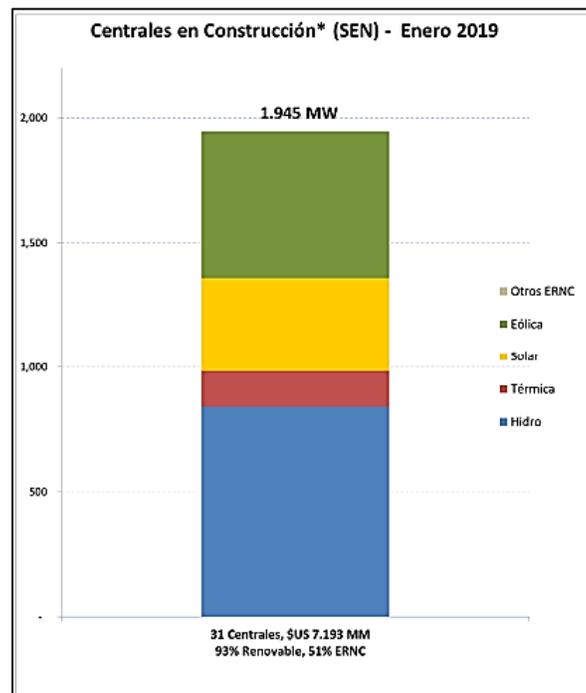


Ilustración 2: Centrales en construcción Enero 2019. Fuente: Proyectos en Construcción e Inversión en sector Energía a Enero 2019.

Otra arista en el estudio de las plantas en Chile corresponde al Factor de Planta (FP), este valor nos indica la capacidad de generación de una planta solar, el que depende directamente de varios factores: meteorológicos, topográficos y ambientales, características técnicas y eficiencia de distintos componentes. El FP está representado por la siguiente ecuación:

$$FP = \frac{G_d}{24P_i} \quad 1-1$$

Donde G_d corresponde a la generación diaria en MWh y P_i es la potencia instalada en MWh.

En el norte de Chile los valores típicos de planta se varían entre 0.22 a 0.41. Estos valores varían según los factores mencionados anteriormente. Este estudio se basa específicamente en el comportamiento del panel frente a condiciones ambientales adversas, específicamente en la suciedad depositada sobre el cristal [4].

Considerando los ajustes en las leyes nacionales, respecto a las fuentes energéticas del país, Chile camina hacia una matriz energética limpia, cuyo potencial aporte puede provenir de energía solar fotovoltaica, siendo ésta predominante sobre las otras fuentes.

1.2 Estado del Arte.

Como se mencionó anteriormente, la relación que existe entre la potencia inyectada a la red versus la energía que otorgaría una planta en condiciones ideales de operación, indica qué tan eficiente es una planta de generación. Dichos factores ya sean intrínsecos (tipo de panel, eficiencia de componentes utilizados) o externos (medio ambientales, geográficos) afectan de manera severa en el desempeño general de la planta. A continuación, se mencionan algunos factores claves a tener en consideración para poder mejorar el Factor de Planta.

1.2.1 Efectos propios del panel.

El tipo de construcción de las celdas fotovoltaicas, la temperatura de trabajo y los efectos de reflexión y suciedad corresponden a factores intrínsecos del panel.

1.2.1.1 Módulo policristalino.

Son módulos fabricados a partir de silicio puro fundido y dopado con boro, pero con menor cantidad de fases de cristalización que los monocristalinos. Poseen un rendimiento entre el 13 y 15%. Se consideran generalmente más económicos que los paneles monocristalinos, pero presentan un mejor performance en ambientes de altas temperaturas.

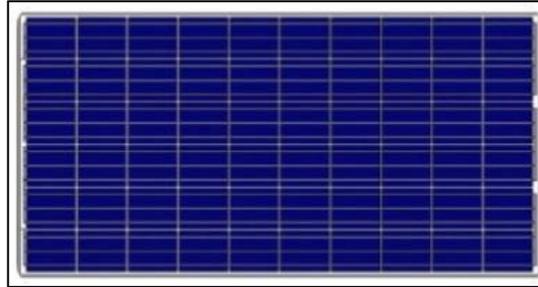


Ilustración 3: Panel fotovoltaico policristalino.

1.2.1.2 Módulos monocristalinos.

Son módulos fabricados a partir de silicio puro fundido y dopado con boro. Poseen eficacias mayores a los policristalinos, su rendimiento oscila entre 17 y 20%. Marcando una gran diferencia cuando se trata de plantas fotovoltaicas de gran tamaño, suministrando una mayor cantidad de potencia a la red. Su vida útil suele ser mayor que los paneles policristalinos.

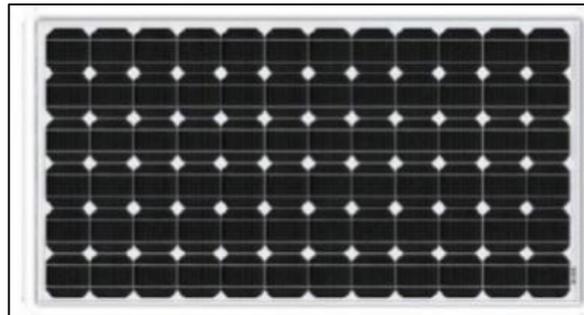


Ilustración 4: Panel fotovoltaico monocristalino

1.2.1.3 Capa Fina (amorfos).

Son fabricados a base de la técnica de recubrimiento superficial en sustratos como vidrio o plástico. Su rendimiento oscila entre 7 y 9%. Su costo de producción es considerablemente más bajo que los paneles mencionados con anterioridad, reduciendo costos de producción, siendo esa su ventaja competitiva versus los policristalinos y monocristalinos.



Ilustración 5: Panel fotovoltaico capa fina(amorfos).

1.2.1.4 Temperatura de funcionamiento.

El rendimiento eléctrico y la potencia de salida del panel son linealmente dependientes de la variable temperatura. Una parte de la radiación absorbida por el panel se transforma eventualmente en corriente eléctrica, sin embargo, el excedente se transforma en calor disipado. Este calor aumenta la temperatura en el panel, el módulo se ve afectado producto de una saturación de corriente, disminuyendo considerablemente su eficiencia [5].

1.2.1.5 Efecto de la reflexión y suciedad.

Se consideran efectos propios al panel, debido a que la radiación que incide en la superficie del panel es mayor a la que captan las células solares al interior de éste. Este fenómeno se produce principalmente por la reflexión del cristal superior.

Respecto a la reflexión, el módulo que caracteriza se denomina modificación por ángulo de incidencia (IAM). Este módulo depende directamente del material de la cubierta y espesor. [6]

La suciedad sobre el cristal también corresponde indirectamente a una variable interna, debido a que el cristal superior permite en cierta manera captar las partículas de polvo y disminuir el área de absorción de la radiación solar.

Es en este punto donde se abre la opción para estudiar el ámbito de recubrimientos sobre paneles solares, con la finalidad de disminuir la reflexión, crear superficies auto limpiantes con tecnología hidrofóbicas, también es posible mezclar propiedades deseadas, como por ejemplo anti reflectante e hidrofóbica a la vez.

1.2.2 Efectos externos al panel.

Los factores externos al panel se producen directamente por variaciones climáticas, el ángulo de inclinación y/o la sombra proyectada sobre el panel. Estas variables afectan al

igual que las variables internas, de manera directa al rendimiento del panel solar fotovoltaico [7].

Las variables relacionadas con factores externos no se estudiarán en profundidad, debido a que el proyecto apunta a mejorar las propiedades internas por medio de recubrimientos.

Los factores en el panel solar influyen directamente en su comportamiento, el que se describe por dos graficas I-V y P-V. A continuación, se muestran diferentes curvas características un panel fotovoltaico.

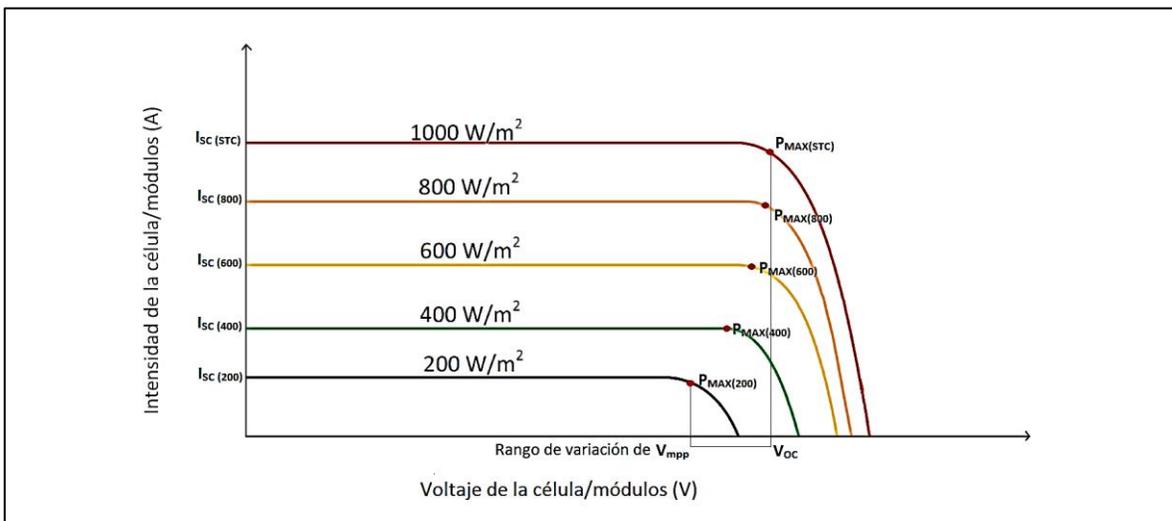


Ilustración 6: Curva I-V para diferentes niveles de irradiancia [8].

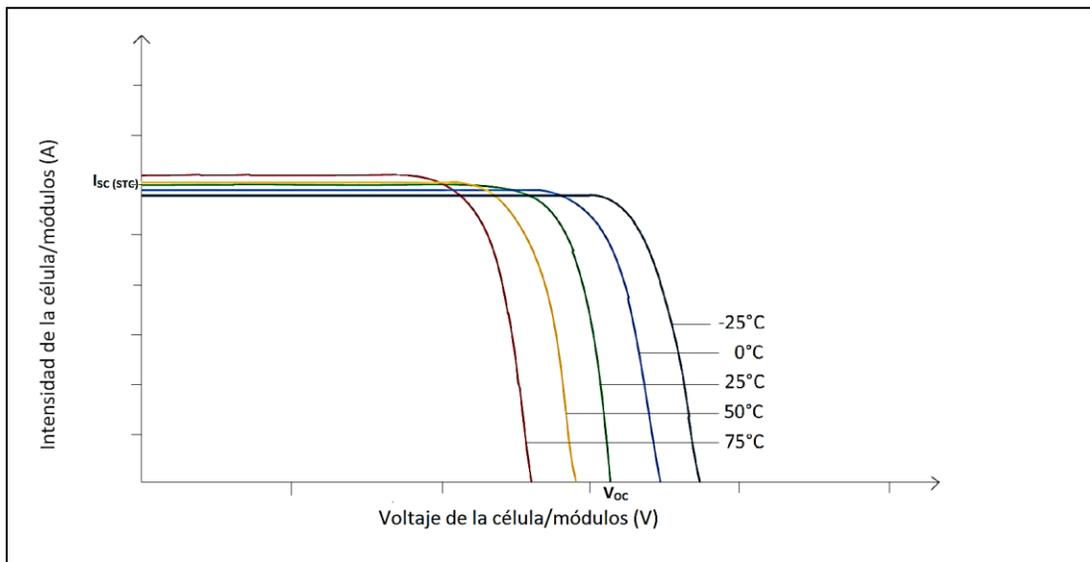


Ilustración 7: Curva I-V para diferentes niveles de temperaturas [8].

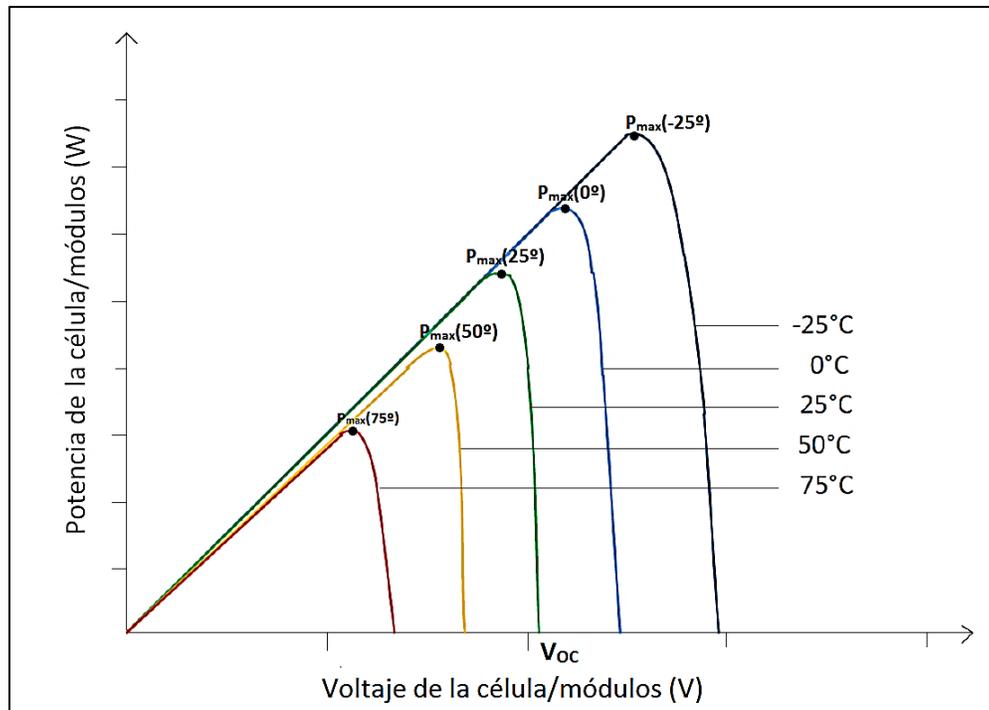


Ilustración 8: curva P-V para diferentes niveles de temperatura [8].

La potencia suministrada por un panel fotovoltaico está expresada por la siguiente ecuación:

$$P_L = V_L * I_L \quad 1-2$$

La irradiancia afecta de manera directa la intensidad de cortocircuito del panel (I_{sc}), respondiendo respecto a la siguiente expresión:

$$I_{SC(G)} = G * \frac{I_{SC(STC)}}{1000} \quad 1-3$$

Con:

I_{SC(G)}: Intensidad de la corriente en función de irradiancia G.

I_{SC(STC)}: Intensidad de la corriente en condiciones estándar (T° = 25°C, G = 1000 $\frac{W}{m^2}$).

G: Irradiancia $\frac{W}{m^2}$.

La relación que define la temperatura de trabajo de una celda fotovoltaica se relaciona directamente con la temperatura ambiente y la irradiancia:

$$T_c = T_a + G * \frac{T_{ONC} - 20}{800} \quad 1-4$$

Con:

T_c : Temperatura de trabajo de la celda.

T_a : Temperatura ambiente.

T_{ONC} : Temperatura de operación nominal de la celda.

G : Irradiancia $\frac{W}{m^2}$.

1.2.3 Métodos de limpieza.

Diversas investigaciones y emprendimientos se basan en utilizar mecanismos de limpieza, aplicados específicamente a plantas fotovoltaicas, ya sean industriales como residenciales. La finalidad de la limpieza es absorber la mayor cantidad de irradiancia, como se mencionó anteriormente el polvo afecta el desempeño.

Existen diferentes métodos para conseguir realizar la acción de limpieza, estos varían en tecnología y principios de operación.

A continuación se mencionan las técnicas actualmente utilizadas tanto en plantas residenciales como industriales para abatir el porcentaje de pérdidas energéticas producidas por suciedad sobre el panel.

1.2.3.1 Herramientas manuales.

Son utilizadas principalmente en pequeñas plantas residenciales y poseen alto riesgo en su ejecución, debido al riesgo de caída de diferente altura y al riesgo de electrocución. Son labores realizadas por empresas especialistas que utilizan obreros para sus labores [9]. Dentro de las soluciones manuales es posible encontrar:

- a) **Sistema de limpieza con pértigas:** Corresponde a uno de los elementos más utilizados en vidrios y paneles fotovoltaicos. Son bastones expandibles capaces de limpiar toda la superficie del panel, necesita agua para la limpieza. Su ventaja es el costo de adquisición bajo comparado con otros sistemas, como desventaja, desperdician mucha agua en la ejecución, además de ser lenta. Pueden ser utilizados por una persona (Ilustración 9).
- b) **Sistema de limpieza con agua a presión:** Corresponde a un vehículo o maquinaria equipada con depósitos de agua y un sistema de bombeo. El trabajo corresponde en remover la suciedad del panel con un chorro de agua a presión, el que deja la

superficie libre de residuos. El sistema es versátil y puede acceder a diferentes plantas con tipologías distintas. Su desventaja es el desperdicio de agua en la ejecución.



Ilustración 9: Limpieza manual de paneles fotovoltaicos. Fuente www.servi.cl.

1.2.3.2 Sistemas robóticos.

Existen dos grandes áreas en la limpieza asistida por robots, remotos y automáticos. La ventaja de este sistema sobre los otros mencionados radica en la rapidez con la que se ejecuta la limpieza.

Se muestran ejemplos de algunos robots utilizados en labores de limpieza sobre paneles fotovoltaicos, además de la eficiencia de cada uno de ellos.

1.2.3.3 Sistemas robóticos remotos.

Son robots accionados vía remota, no poseen la capacidad de distinguir zonas que requieran mayor concentración de limpieza. Dependen directamente de un operador, limitando el radio de operación. Su costo es menor al de los robots autónomos.

- a) **Robot GEKKO Solar:** Posee una capacidad de limpieza superficial de $400 \text{ m}^2/\text{h}$ y su rango de inclinación máxima son 45° . Puede operar en diferentes tipos de plantas. El mecanismo está basado en cepillos giratorios y uso de agua desmineralizada. Sus beneficios con la alta eficiencia de limpieza, llegando a ser 4 veces más rápido que las técnicas manuales. Como desventaja debido a su funcionamiento remoto, está limitado a un radio de trabajo [10]. Ilustración 10.

- b) **Sistema de rodillo autopropulsado:** Es un vehículo que posee un brazo extensible, sistema de bombeo de agua y un rodillo con fibras limpiadoras, cuyo material no debe dañar ni rayar la superficie del panel. Requiere solo un operador para su ejecución, al ser un equipo de grandes dimensiones requiere espacio necesario para su movilidad dentro de la planta. Como desventaja está el mal uso, debido a su gran tamaño puede dañar de forma permanente algunos componentes si su operación no es la correcta, llegando a dañar el vidrio y reduciendo la transmitancia de éste. Ilustración 11.



Ilustración 10: Robot GEKKO Solar remoto. Fuente: www.serbot.ch.



Ilustración 11: Sistema de limpieza de paneles fotovoltaicos por rodillos. Fuente: Estación minera.

1.2.3.4 Sistemas robóticos autónomos.

Los robots autónomos de limpieza poseen sensores y baterías capaz de otorgar jornadas laborales extensas, trabajando incluso de noche. En [10] se muestran distintos robots autónomos, los que varían en tamaño, precio y nivel de desarrollo. Un ejemplo de robots autónomo de limpieza se muestra a continuación:

- a) **The NOMADD:** Es un robot que no utiliza agua para desarrollar sus labores de limpieza. Esta creado principalmente para zonas desérticas y ha mostrado eficiencias de un 99.6% de eliminación del polvo en el panel fotovoltaico. Actúa sobre filas de paneles de hasta 200 metros de longitud y 5 metros de ancho [11].

Mostrados los distintos métodos que operan sobre la problemática de la suciedad sobre los paneles fotovoltaicos y requiriendo diferentes soluciones del punto de vista económico y eficiencia hídrica es necesario plantear múltiples soluciones. Por eso el proyecto busca dar solución a esta problemática, mediante el uso de recubrimiento por pulverización en el cristal del panel fotovoltaico, cuya finalidad, depende del fluido a verter según las características deseadas por tratamiento superficial.

1.2.4 Recubrimientos

Los recubrimientos se utilizan para modificar propiedades físicas, químicas y morfológicas de una superficie. Pueden utilizarse sobre distintos tipos de materiales y con diferentes estructuras. Las aplicaciones en las mejoras superficiales son muchas, desde funcionales hasta estéticas [12].

Algunas de las aplicaciones son:

- a) **Ópticamente funcional:** Reflectivos, transmitancia, laser ópticos, reflectivos y anti reflectivos.
- b) **Relacionado con la energía:** películas delgadas de baterías, películas de celdas solares, recubrimientos foto catalíticos, recubrimiento electrónico.
- c) **Eléctricamente funcional:** conductores eléctricos, contactos eléctricos, capas semiconductoras, fotovoltaico.
- d) **Mecánicamente funcional:** películas de lubricación, nanocompuestos, resistentes a erosión.

- e) **Químicamente funcional:** recubrimientos resistentes a la corrosión, recubrimientos catalíticos, recubrimientos biomédicos, materiales orgánicos.

La Tabla 1 muestra distintas funciones con sus respectivos objetivos a desarrollar con los recubrimientos.

Tabla 1: Funciones de recubrimientos con aplicaciones prácticas. [13]

Funciones eléctricas	Aplicaciones
Materiales aislantes	Sustratos de circuitos integrados
Materiales ferroeléctricos	Condensador cerámico
Materiales semiconductores	Sensores de infrarrojo, filtros de luz
Materiales conductores iónicos	Sensores de oxígeno
Funciones ópticas	
Capas anti - reflectantes	Óptica tradicional
Capas porosas	Fotovoltaico, óptica de láseres
Capas absorbentes	Fotocromáticas, fotosensibles, coloreadas
Altísima transmisión óptica	Óptica integrada
Capas de emisión secundaria	Luminiscentes
Cerámicos PLZT	Optoelectrónicos
Funciones químicas	
Sensores de gases	Detectores de hidrogeno
Baja atacabilidad química	Botellas y productos de vidrios
Funciones mecánicas	
Cambio iónico, bajo coef dilatación	Endurecimiento químico
Extremos de temperatura	Protección mecánica de envases
Funciones biológicas	
Capas de hidroxiapatita y bio - vidrios	Prótesis

Existen diversos procesos por el cual se logra depositar una capa delgada sobre un sustrato. Existen muy pocos métodos básicos para aplicar recubrimientos, muchos de los procesos utilizados a nivel industrial operan en base a principios fisicoquímicos o químicos.

La familia de los procesos de tratamientos superficiales son principalmente cuatro.

- a) Tratamientos térmicos e implantación de iones.
- b) Pintura e impresión.
- c) Pulido / grabado / trabajo / texturizado.
- d) Recubrimientos de superficies.

Cada una de las familias mencionadas anteriormente, poseen distintos procesos para poder llevar a cabo la finalidad del recubrimiento. Según las hipótesis planteadas, se estudiarán los procesos del tipo *Spraying* o pulverización directa, los que pertenecen a la familia de pintura e impresión.

Los procesos de pulverización se dividen en dos categorías: Macroscópico y microscópico.

El proceso más común corresponde a la pulverización con aire (Ilustración 12) y sin aire. Corresponde a un proceso macroscópico. El aire aporta velocidad del fluido, superando la velocidad crítica de éste se atomiza en gotas pequeñas, las que se pulverizan sobre un sustrato. Este método puede lograr acabados con espesores entre 10 μm y 200 μm según el tiempo de exposición del pulverizado [12].

Existen diversas investigaciones y aplicaciones de tratamientos superficiales sobre paneles fotovoltaicos, los que apuntan a mejorar el desempeño de éste, sin realizar cambios estructurales en las plantas y ofreciendo una mejora a los paneles actualmente operativos.

Una superficie que ofrece mejoras en las propiedades internas de los paneles fotovoltaicos puede ser aquella que tenga propiedades hidrofóbicas, anti reflectante y con alta transmitancia. Esto ayudaría a auto eliminar cualquier partícula depositada sobre el cristal, una problemática que está presente hoy en día en las plantas de generación y es uno de los causales del bajo factor de planta.

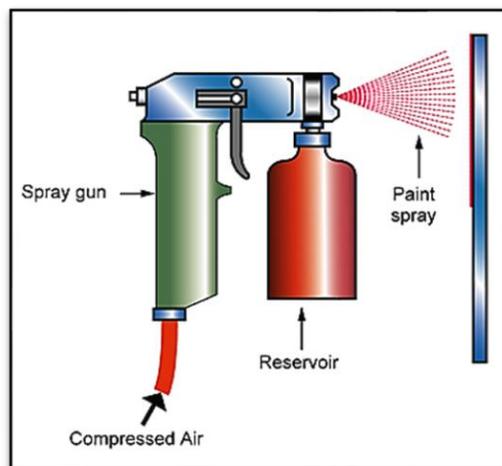


Ilustración 12: Esquema de un proceso de pulverizado con aire. Fuente: CES EduPack 2018.

Un recubrimiento auto limpiante se basa en el fenómeno de utilizar superficies rugosas con micro y nano estructuras jerárquicas, cuyo material posee una energía superficial baja, elevando el ángulo de contacto con el agua (mayor a 150°) y bajando el ángulo de deslizamiento (menor a 5°). Por lo tanto, el efecto de autolimpieza se relaciona directamente con la propiedad hidrofóbica de una superficie [14].

En [15] se realizó un estudio con recubrimientos en base de agua para producir una película anti – reflectiva en paneles fotovoltaicos. Las pruebas experimentales las realizaron sobre vidrios, y se sometieron a pruebas de transmitancia y reflectancia, arrojando resultados positivos frente a vidrios sin tratar. La apuesta es utilizar compuestos en base de agua, reduciendo el impacto ambiental que produce el método SOL-GEL, cuyas bases son ácidos industriales.

Otro estudio presentado por [16] muestra la creación de una superficie auto limpiante para paneles fotovoltaicos, con la finalidad de optimizar recursos de operaciones de limpieza en las plantas solares. Se utiliza el método de pulverización directa de TiO₂ nanoestructurado diluido en agua, lo que lo hace un atractivo compuesto para el impacto ambiental. La pulverización se realiza en condiciones ambientales estándar, pero el fluido se presuriza con aporte de aire comprimido a 1.5 Bar.

Este método concluye que la transmitancia se ve afectada, disminuyendo para longitudes de ondas bajas. La Ilustración 13 muestra una curva característica de la transmitancia con un vidrio tratado superficialmente y un vidrio sin tratar. Se ve una leve disminución de la transmisión de luz para longitudes de ondas menores a 1000 nm.

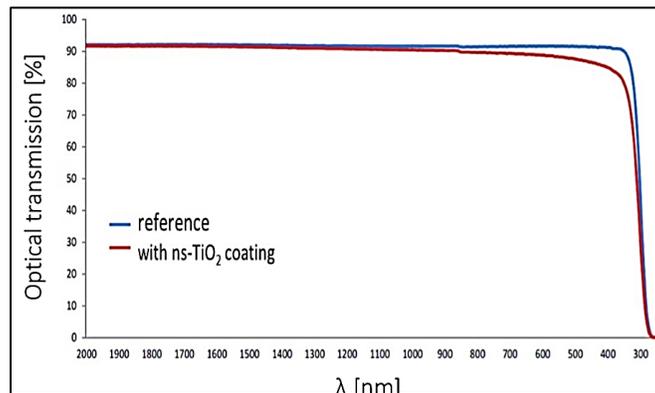


Ilustración 13: Comparación de transmisión óptica en un vidrio recubierto con TiO₂ y un vidrio natural [16].

En la Ilustración 14 se observa la curva característica del panel fotovoltaico antes y después de un tratamiento superficial de TiO₂ con nanopartículas. Para una Irradiancia de $800 \frac{W}{m^2}$. No se ve una mayor alteración en el desempeño eléctrico del panel fotovoltaico.

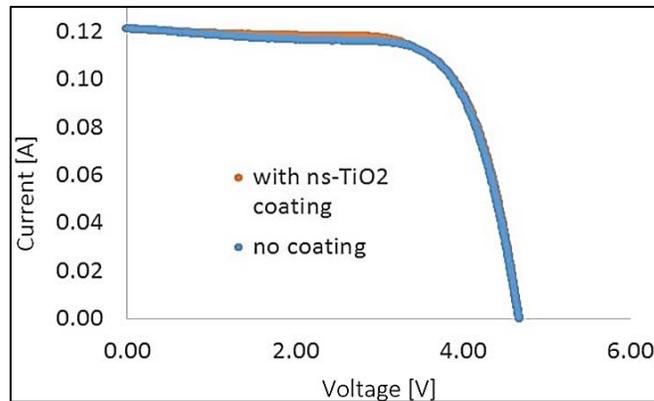


Ilustración 14: Curva I-V para un PV con tratamiento superficial autolimpiante y otro sin recubrir [16].

Con los antecedentes mencionados anteriormente es posible observar una oportunidad en el estudio y desarrollo de tecnología basado en manufactura aditiva. En la actualidad existen paneles instalados y funcionando, con déficit de propiedades superficiales por el avance tecnológico. La finalidad es poder desarrollar un método de pulverización que no requiera condiciones de operación complejas (vacío, altas temperaturas, etc.), para así optar por una solución en terreno.

Se ha visto en el estado del arte que existen métodos de limpieza para combatir la deposición de polvo en el panel solar, y con ello lograr una mayor potencia suministrada, también se observó la aplicación de tratamientos superficiales con diferentes características, capaces de mejorar las características que los paneles por si solos no son capaces de lograr.

Es así como se establece la hipótesis de trabajo para esta memoria. Fabricar un método de tratamiento superficial, capaz de lograr que las plantas generadoras puedan ahorrar en costos destinados al mantenimiento de limpieza. Que sea un método fácil de emplear. Por lo tanto, a continuación de muestra el desarrollo del diseño de un sistema automatizado de pulverización para recubrimientos superficiales en paneles fotovoltaicos, el que será validado con la construcción de un banco de pruebas para el estudio de diferentes tipos de recubrimientos.

1.3 Problemática.

Según lo revisado en el estado del arte, una de las problemáticas existentes en las plantas generadoras de energías renovables no convencionales, que utilizan paneles fotovoltaicos, corresponde a la pérdida de eficiencia en la generación. Uno de estos factores corresponde al manejo del polvo depositado naturalmente en estos dispositivos, se vieron diferentes técnicas de mantención preventiva relacionadas a este punto, tales como, limpieza manual o automatizada, asistidas con o sin agua. Se propone aplicar una mejora al panel, otorgando una capa de recubrimiento con capacidades auto limpiantes, lo que provocaría una mejora en la superficie del vidrio utilizado en la fabricación. Esto puede contribuir a la disminución de la frecuencia de limpieza, por ende a minimizar costos en mantención.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo General.

El objetivo general del proyecto es:

Diseñar y fabricar sistema automatizado de recubrimientos superficiales para paneles fotovoltaicos u otros materiales.

1.4.2 Objetivos Específicos.

Los objetivos específicos de este proyecto son los siguientes:

- a) Seleccionar método de deposición del recubrimiento.
- b) Diseñar estructura de la cámara de recubrimientos.
- c) Seleccionar mecanismo de transmisión de pulverizadores.
- d) Determinar espesor teórico del recubrimiento.
- e) Determinar velocidad lineal de pulverizadores.
- f) Seleccionar componentes mecánicos y eléctricos.
- g) Estudiar costos de fabricación del prototipo de la máquina.
- h) Generar de planos de la planta con software de diseño *®Autodesk Inventor 2017*.
- i) Realizar un control basado en los requerimientos de la planta (espesor de recubrimientos).

1.5 Alcances y Limitaciones.

El alcance del proyecto contempla los siguientes puntos:

- a) Diseño y construcción de banco de pruebas de pulverización automático.
- b) Puesta en marcha de planta de pulverización.
- c) Se deberá implementar una interfaz para la operación de la planta.

Las limitaciones del proyecto corresponden a la siguientes:

- a) Las compras para la fabricación deben ser realizadas por mercado público.
- b) La fabricación del prototipo se realizará con maquinaria de la Universidad de Talca, por lo cual el taller mecánico presenta limitantes en cantidad de equipos disponibles.
- c) El químico que se utilizará para la pulverización corresponde a un estudio externo a la construcción de la planta de pruebas.

1.6 Metodología.

Para la implementación y puesta en marcha el trabajo se divide en tres etapas. La Ilustración 15 muestra la organización para el desarrollo del trabajo.

La primera etapa se basa en la investigación de los diferentes métodos utilizados para dar solución a la problemática.

La segunda etapa en conjunto con información adquirida en la primera etapa se basará en el diseño del prototipo, siempre considerando la selección metódica para cada componente a utilizar.

La tercera y última etapa se enfoca en la implementación del diseño de la etapa II, al término de esta etapa se pretende realizar pruebas con recubrimientos en conjunto con el profesor guía, para la validación de los supuestos anteriormente planteados.

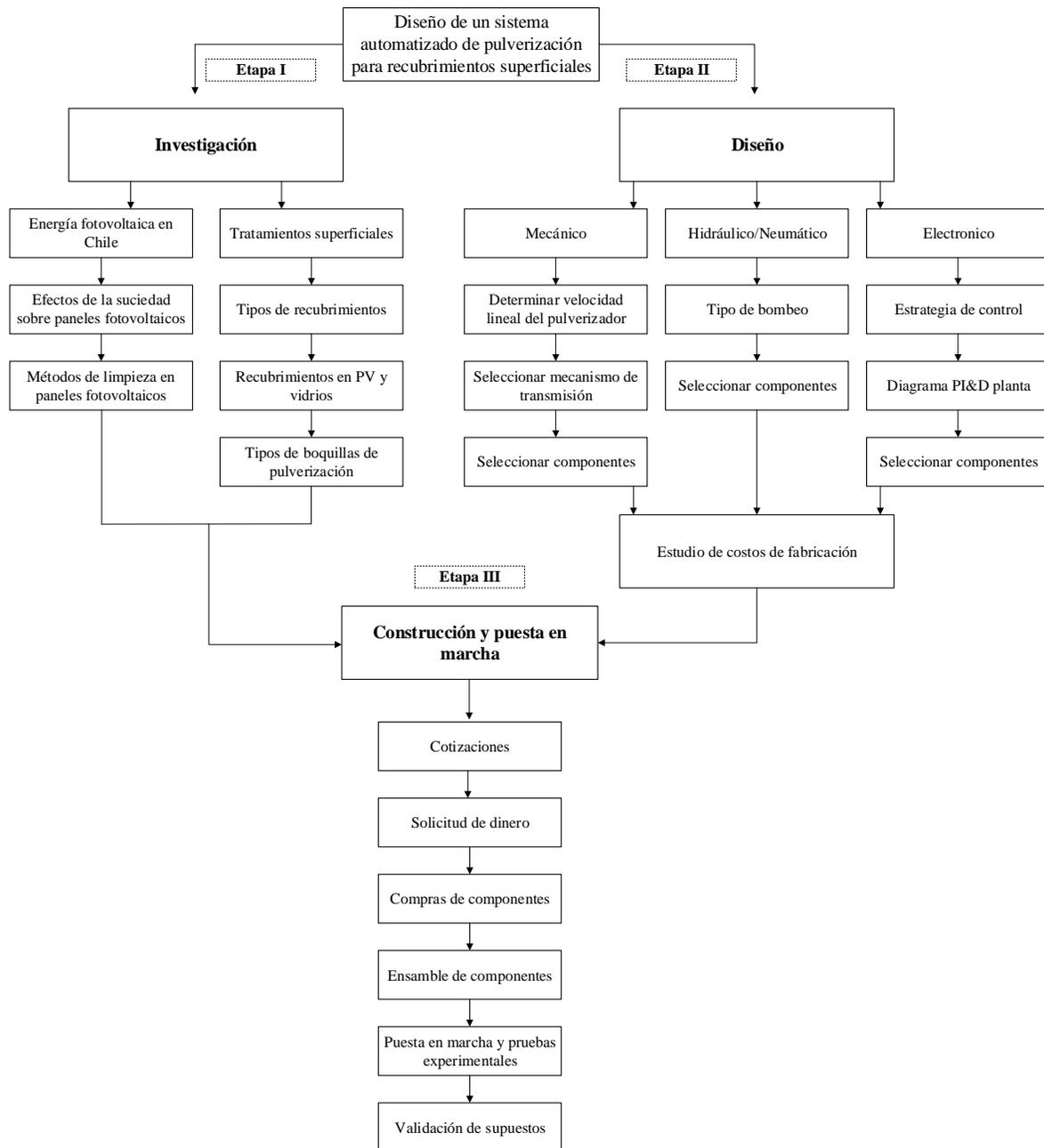


Ilustración 15: Diagrama de organización para el desarrollo del trabajo.

2 Diseño conceptual y alternativas de diseño.

2.1 Análisis de requerimientos.

Para el diseño del prototipo, se deben seleccionar los componentes idóneos a utilizar. Para ello es necesario establecer parámetros de operación.

- a) El área del pulverizado será de 600 mm x 800mm.
- b) Velocidad de pulverizado: 0.15 – 3 m/s.
- c) Altura boquilla: 300mm – 400mm.
- d) Recubrimiento de un líquido con nano o micropartículas (Ejemplo: n-TiO₂ (nanopartículas de óxido de titanio)).

2.2 Estructura base.

La estructura base de la maquina corresponde a un punto crítico en el diseño mecánico y para el mecanismo de transporte a utilizar. Cabe mencionar que la finalidad es, construir una cámara para pruebas experimentales de recubrimientos.

El diseño estructural de la cámara de pruebas es realizado por medio del software ®Autodesk Inventor 2017.

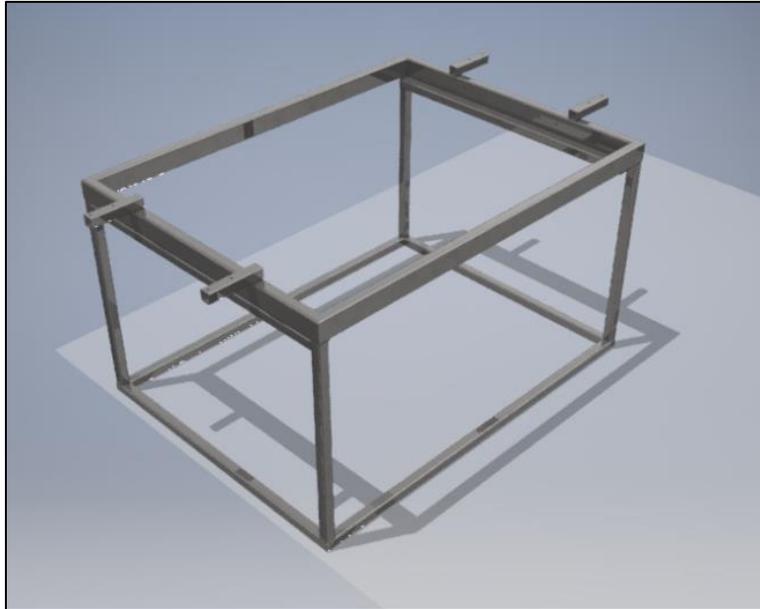


Ilustración 16: Estructura base máquina de recubrimientos. Fuente: Elaboración propia.

Los materiales disponibles a nivel nacional (y que estén dentro de Chile proveedores) para realizar la estructura diseñada anteriormente son los siguientes:

2.2.1 Perfiles de aluminio tipo V-SLOT.

Corresponde a un elemento ampliamente utilizado en estructuras con amplio detalle de ensamble. La ventaja de utilizar este tipo de material es que no requiere soldadura para la unión de los perfiles, pero si necesita coplas específicas para realizar esta acción.

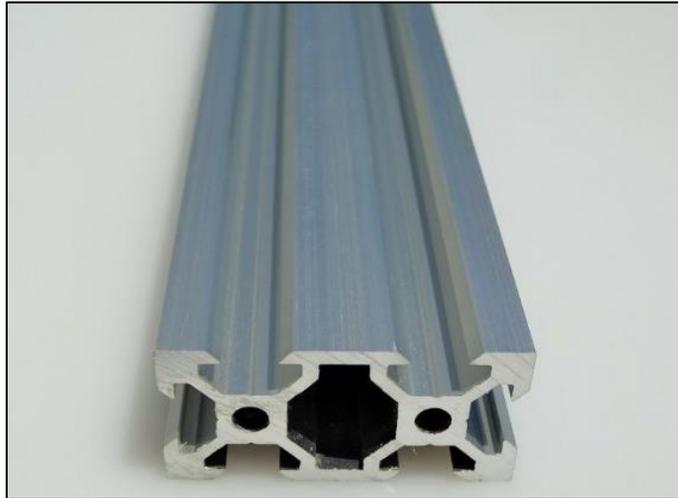


Ilustración 17: Perfil aluminio V-SLOT. Fuente: www.cimech3d.cl

2.2.2 Perfiles de acero.

Los perfiles genéricos de acero al carbono de calidades A240ES o A270ES según la norma chilena NCh203-2005, son altamente utilizados para uso de estructuras ligeras. Permiten uniones por soldaduras.



Ilustración 18: Perfil Acero A240ES. Fuente: www.sodimac.cl

2.2.3 Acero inoxidable.

Los perfiles de acero inoxidable AISI-304 según norma ASTM A-554 pertenecen a la familia estructural. Son utilizado especialmente en ambientes corrosivos y de uso industrial.



Ilustración 19:Perfiles acero inoxidable AISI 304.Fuente www.acerosotero.cl.

2.3 Mecanismo de transmisión del pulverizador.

Para realizar la selección de mecanismos de desplazamientos lineales, se deben tener consideración dos parámetros fundamentales, las velocidades máximas y la carga a transmitir.

Existen dos principales métodos de transmisión del movimiento circular a lineal, la por correas dentadas (Ilustración 21) y transmisión por husillo (Ilustración 20).

2.3.1 Transmisiones por tornillos sin fin.

Los tornillos de potencia se utilizan para transmisión de mecanismos de forma suave y uniforme, transforman el movimiento rotacional en lineal. Existen variedades de aplicaciones relacionados a este mecanismo: Sistemas de elevación de cargas, tornillos de avance en torno, prensas tipo tornillo, grapas, vástagos de válvulas. Usualmente se utilizan para transmitir potencia, pero no a grandes velocidades [17].



Ilustración 20: Desplazador lineal por husillo.

2.3.2 Transmisiones con banda sincrónicas y cadenas.

Son mecanismos que ofrecen máxima versatilidad para transmitir potencia. En este tipo de transmisión se reduce la vibración del mecanismo y reduce el ruido respecto a otros métodos [18]. Presentan alto desempeño para elementos que requieren sincronización. Usualmente se utilizan para velocidades de 10 a 60 m/s. Se destacan ventajas como fácil instalación, bajo nivel de mantenimiento, alta fiabilidad.



Ilustración 21: Actuador lineal por correas dentadas.

2.4 Tipo de motores eléctricos.

Independiente del tipo de transmisión a utilizar se debe tener presente los tipos de motores eléctricos utilizados para realizar este tipo de movimiento.

Motor DC.

Es un dispositivo electromecánico capaz de transformar energía eléctrica en mecánica con movimiento rotacional por fuerzas electromagnéticas. Existen en el mercado distintos tamaños y niveles de tensión. Está principalmente compuesto por: rotor y estator. Usualmente este tipo de motores necesitan control de lazo cerrado para realizar seguimiento de posiciones o velocidades específicas. Este tipo de motores presenta dificultades para realizar controles de posición y velocidad debido a la inercia propia del motor.



Ilustración 22: Motor DC. Fuente: www.mechatronicstore.cl

Motor Paso a paso.

Es un dispositivo electromecánico que tiene la particularidad de efectuar movimientos precisos en ángulos definidos por pasos. Tiene una amplia gama de aplicaciones de precisión como CNC , manipuladores, impresoras 3D, lector de CDs, etc. El control es más complejo que un motor DC y requiere drivers específicos.

Tienen la característica de mover a pasos discretos, donde estos pasos son producidos por bobinas llamadas fases. Según la cantidad de fases del motor pueden ser denominados:

- a) **Motor paso a paso unipolar:** Corresponde al motor paso a paso más común utilizado en la industria de la robótica. Se caracteriza por tener 2 bobinas en cada estator con un punto en común.

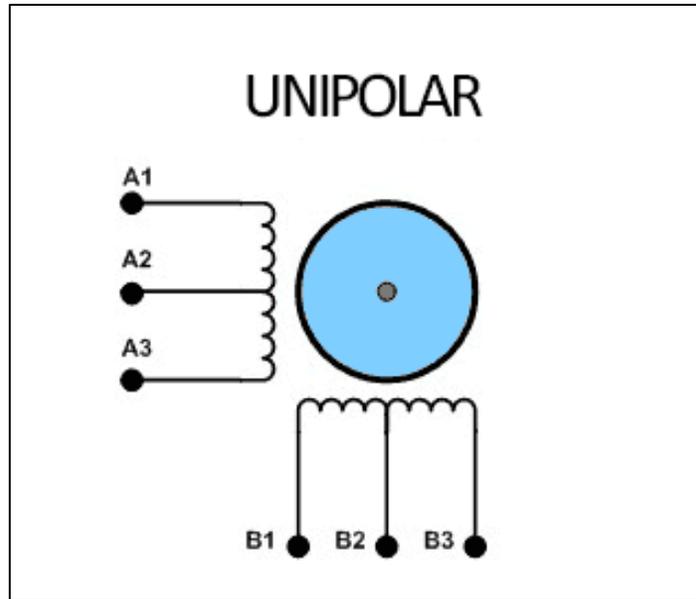


Ilustración 23: Diagrama motor paso a paso unipolar.

- b) **Motor paso a paso bipolar:** Posee dos bobinas, principalmente posee 4 pines de conexión. La polaridad de los bobinados puede cambiar y no poseen un punto común.

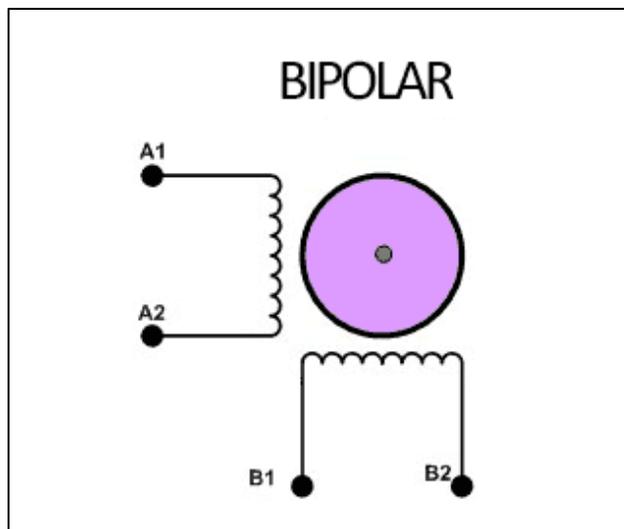


Ilustración 24: Diagrama motor paso a paso bipolar.



Ilustración 25: Motor Paso a Paso bipolar. Fuente: www.cimech3d.cl

2.5 Sistemas de bombeo de fluidos.

Las bombas son mecanismos utilizados para impulsar líquidos mediante un sistema de tuberías. La finalidad de una bomba es elevar presión del fluido al final de su trayectoria, respecto al punto inicial.

Para poder seleccionar una bomba es muy importante conocer la naturaleza del fluido a transportar, por ejemplo, temperatura, gravedad específica, viscosidad y la tendencia que posee de corroer y erosionar las partes internas de la bomba.

Principalmente existen dos grandes familias de bombas:

2.5.1 Bombas de desplazamiento positivo.

Envían una cantidad de fluido fija por cada rotación que se genere en el eje de la bomba. Se caracterizan por otorgar presiones fijas y está pierde eficiencia por desgaste mecánico en sus componentes rotatorios. La mayoría de este tipo de bombas opera con líquidos con un amplio rango de viscosidades.

Si el fluido posee densidades altas, las bombas de desplazamiento positivo son la adecuadas, lodos, hidrocarburos, aguas residuales y otros campos.

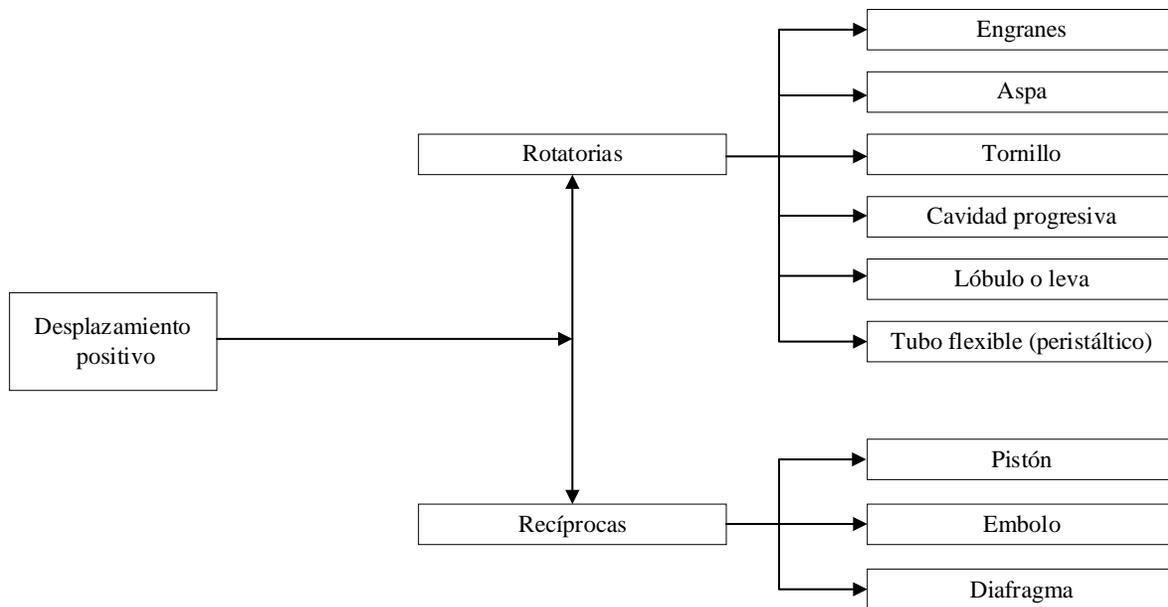


Ilustración 26: Tipo de bombas de desplazamiento positivo. Fuente: Mecánica de fluidos, R. Mott.



Ilustración 27: Bombas desplazamiento positivo.

2.5.2 Bombas cinéticas.

La finalidad de una bomba cinética es agregar energía al fluido, acelerándolo con la rotación del impulsor. Normalmente el fluido se lleva hacia el centro del impulsor para luego ser lanzado por las aspas. Una vez que el fluido sale de las aspas, se dirige hacia la red de tuberías, transformando la energía cinética en presión.

Usualmente este tipo de bombas se encuentra en sistemas de agua, ya sea potable o uso agrícola(riego). Suelen trabajar con viscosidades relativamente bajas, al aumentar viscosidad del fluido a transportar, éste pierde velocidad.

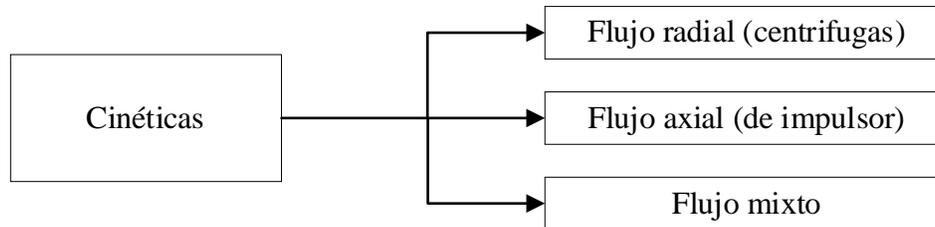


Ilustración 28: Tipo de bombas cinéticas. Fuente: Mecánica de fluidos, R. Mott.

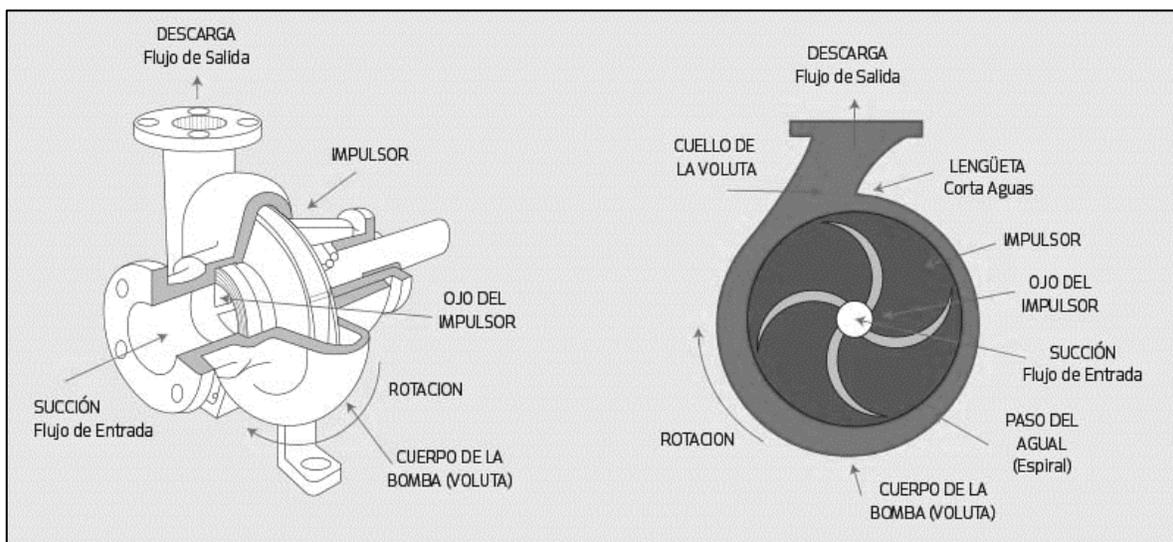


Ilustración 29: Ejemplo bomba centrífuga.

2.5.3 Tanques presurizados hidroneumáticos.

Otros dispositivos (menos utilizados) capaces de elevar la presión de fluidos, son los denominados tanques o recipientes presurizados. Corresponden a recipientes que contienen aire comprimido y algún fluido sometido a una determinada presión dentro del mismo espacio físico. Consta de una línea de carga (aire) y otra de descarga (fluido a transportar). El fluido a presurizar se carga previa a la operación del tanque. Estos dispositivos cuentan con una tapa para poder acceder al interior del tanque.

Se ven reflejados tres ventajas en este tipo de sistema: presurización del fluido en rango de presiones seleccionadas, ahorro energético por uso de bombas impulsoras, reducción del golpe de ariete típico de bombas elevadoras [19]. La ventaja potencial de este método radica en no discriminar el tipo de sustancia a transportar, debido a que no existen

partes mecánicas que entren en contacto directo con él, y el transporte se ejecute por diferencias de presiones.



Ilustración 30: Tanques presurizados. Fuente: www.nordson.com

2.6 Tipo de boquillas de aspersión.

En el mercado existen diferentes tipos de boquillas para realizar recubrimientos de precisión. La selección de la boquilla a utilizar en este estudio se basa en el Catálogo 70M de *Spraying System Co* ®.

Los diferentes tipos de patrones otorgados por los fabricantes definen la aplicación del proceso, desde lavado de superficies hasta recubrimientos finos. Algunos patrones de aspersión son:

- a) Cono hueco.
- b) Cono lleno.
- c) Aspersión plana (uniforme, bordes ahusados, tipo deflector).
- d) Chorro sólido.
- e) Aspersión fina.
- f) Atomización con aire.

La capacidad de cada boquilla Q (l/min) depende directamente de la presión de trabajo y del fluido. Otro aspecto de desempeño radica en el ángulo de aspersión, el que está directamente relacionado con la cobertura del recubrimiento. Existen diferentes combinaciones de ángulo de aspersión vs altura de la boquilla para obtener un resultado de cobertura.

Para seleccionar el ángulo de aspersión y cobertura se utiliza la Tabla 2, que indica la cobertura teórica, utilizando agua como fluido de pruebas.

Basándose en el área de operación, la que posee un ancho a recubrir de 600 (mm) el ángulo de aspersión a utilizar será de 110°, ya que posee una diversidad de cobertura a distintas alturas de la boquilla respecto al sustrato a recubrir.

De los tipos de aspersión comentados se selecciona la aspersión plana, ya que gracias al patrón de aspersión se pueden lograr coberturas uniformes y delgadas. Se desean depositar capas delgadas de la película protectora, por lo que es necesario escoger boquillas con bajo caudal y que proporcionen tamaños de gota pequeños o medianos, para así reducir las velocidades lineales del desplazador lineal.

Tabla 2: Tabla de cobertura teórica de aspersión. Fuente: Catálogo 70M Spraying System Co ®.

COBERTURA TEÓRICA DE LA ASPERSIÓN																								
a Diversas Distancias en Pulgadas (cm) desde el Orificio de la Boquilla																								
Ángulo de Aspersión	2"	5 cm	4"	10 cm	6"	15 cm	8"	20 cm	10"	25 cm	12"	30 cm	15"	40 cm	18"	50 cm	24"	60 cm	30"	70 cm	36"	80 cm	48"	100 cm
5°	.2	.4	.4	.9	.5	1.3	.7	1.8	.9	2.2	1.1	2.6	1.3	3.5	1.6	4.4	2.1	5.2	2.6	6.1	3.1	7.0	4.2	8.7
10°	.4	.9	.7	1.8	1.1	2.6	1.4	3.5	1.8	4.4	2.1	5.3	2.6	7.0	3.1	8.8	4.2	10.5	5.2	12.3	6.3	14.0	8.4	17.5
15°	.5	1.3	1.1	2.6	1.6	4.0	2.1	5.3	2.6	6.6	3.2	7.9	3.9	10.5	4.7	13.2	6.3	15.8	7.9	18.4	9.5	21.1	12.6	26.3
20°	.7	1.8	1.4	3.5	2.1	5.3	2.8	7.1	3.5	8.8	4.2	10.6	5.3	14.1	6.4	17.6	8.5	21.2	10.6	24.7	12.7	28.2	16.9	35.3
25°	.9	2.2	1.8	4.4	2.7	6.7	3.5	8.9	4.4	11.1	5.3	13.3	6.6	17.7	8.0	22.2	10.6	26.6	13.3	31.0	15.9	35.5	21.2	44.3
30°	1.1	2.7	2.1	5.4	3.2	8.0	4.3	10.7	5.4	13.4	6.4	16.1	8.1	21.4	9.7	26.8	12.8	32.2	16.1	37.5	19.3	42.9	25.7	53.6
35°	1.3	3.2	2.5	6.3	3.8	9.5	5.0	12.6	6.3	15.8	7.6	18.9	9.5	25.2	11.3	31.5	15.5	37.8	18.9	44.1	22.7	50.5	30.3	63.1
40°	1.5	3.6	2.9	7.3	4.4	10.9	5.8	14.6	7.3	18.2	8.7	21.8	10.9	29.1	13.1	36.4	17.5	43.7	21.8	51.0	26.2	58.2	34.9	72.8
45°	1.7	4.1	3.3	8.3	5.0	12.4	6.6	16.6	8.3	20.7	9.9	24.9	12.4	33.1	14.9	41.4	19.9	49.7	24.8	58.0	29.8	66.3	39.7	82.8
50°	1.9	4.7	3.7	9.3	5.6	14.0	7.5	18.7	9.3	23.3	11.2	28.0	14.0	37.3	16.8	46.6	22.4	56.0	28.0	65.3	33.6	74.6	44.8	93.3
55°	2.1	5.2	4.2	10.4	6.3	15.6	8.3	20.8	10.3	26.0	12.5	31.2	15.6	41.7	18.7	52.1	25.0	62.5	31.2	72.9	37.5	83.3	50.0	104
60°	2.3	5.8	4.6	11.6	6.9	17.3	9.2	23.1	11.5	28.9	13.8	34.6	17.3	46.2	20.6	57.7	27.7	69.3	34.6	80.8	41.6	92.4	55.4	115
65°	2.5	6.4	5.1	12.7	7.6	19.1	10.2	25.5	12.7	31.9	15.3	38.2	19.2	51.0	22.9	63.7	30.5	76.5	38.2	89.2	45.8	102	61.2	127
70°	2.8	7.0	5.6	14.0	8.4	21.0	11.2	28.0	14.0	35.0	16.8	42.0	21.0	56.0	25.2	70.0	33.6	84.0	42.0	98.0	50.4	112	67.2	140
75°	3.1	7.7	6.1	15.4	9.2	23.0	12.3	30.7	15.3	38.4	18.4	46.0	23.0	61.4	27.6	76.7	36.8	92.1	46.0	107	55.2	123	73.6	153
80°	3.4	8.4	6.7	16.8	10.1	25.2	13.4	33.6	16.8	42.0	20.2	50.4	25.2	67.1	30.3	83.9	40.3	101	50.4	118	60.4	134	80.6	168
85°	3.7	9.2	7.3	18.3	11.0	27.5	14.7	36.7	18.3	45.8	22.0	55.0	27.5	73.3	33.0	91.6	44.0	110	55.0	128	66.0	147	88.0	183
90°	4.0	10.0	8.0	20.0	12.0	30.0	16.0	40.0	20.0	50.0	24.0	60.0	30.0	80.0	36.0	100	48.0	120	60.0	140	72.0	160	96.0	200
95°	4.4	10.9	8.7	21.8	13.1	32.7	17.5	43.7	21.8	54.6	26.2	65.5	32.8	87.3	39.3	109	52.4	131	65.5	153	78.6	175	105	218
100°	4.8	11.9	9.5	23.8	14.3	35.8	19.1	47.7	23.8	59.6	28.6	71.5	35.8	95.3	43.0	119	57.2	143	71.6	167	85.9	191	114	238
110°	5.7	14.3	11.4	28.6	17.1	42.9	22.8	57.1	28.5	71.4	34.3	85.7	42.8	114	51.4	143	68.5	171	85.6	200	103	229	—	286

El tamaño de gota para cada patrón también varía, por lo que es un punto importante a evaluar, para realizar una buena elección de componentes. El tamaño varía entre 20 a 4300 micrones. En la siguiente tabla se ve reflejado el tamaño de gota para diferentes tipos de boquillas del catálogo mencionado anteriormente.

Tabla 3: Tamaño de gota. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.

TAMAÑO DE GOTA por Patrón de Aspersión a Diversas Presiones y Capacidades									
Tipo de Patrón de Aspersión	10 psi (0.7 bar)			40 psi (2.8 bar)			100 psi (7 bar)		
	Capacidad gpm	Capacidad l/min	DMV micrones	Capacidad gpm	Capacidad l/min	DMV micrones	Capacidad gpm	Capacidad l/min	DMV micrones
Aspersión con Aire	.005 .02	.02 .08	20 100	.008 8	.03 30	15 200	12	45	400
Aspersión Fina	.22	.83	375	.03 .43	.1 1.6	110 330	.05 .69	.2 2.6	110 290
Cono Hueco	.05 12	.19 45	360 3400	.10 24	.38 91	300 1900	.16 38	.61 144	200 1260
Aspersión Plana	.05 5	.19 18.9	260 4300	.10 10	.38 38	220 2500	.16 15.8	.61 60	190 1400
Cono Lleno	.10 12	.38 45	1140 4300	.19 23	.72 87	850 2800	.30 35	1.1 132	500 1720

3 Diseño detallado mecanismo de pulverizado.

3.1 Descripción del sistema propuesto.

Una propuesta a la problemática planteada en el capítulo anterior se basaba en analizar la opción de realizar recubrimientos con películas delgadas sobre vidrio, material utilizado para la fabricación de paneles fotovoltaicos y una gran cantidad de componentes utilizados a nivel industrial como doméstico.

Teniendo en cuenta los métodos tradicionales de recubrimientos utilizados en la actualidad y la necesidad de aportar una actualización respecto a propiedades físicas superficiales en materiales que actualmente están operativos, se propone el desarrollo de una cámara de pruebas experimentales a nivel de laboratorio para analizar caso a caso las posibles mejoras que se puedan otorgar a materiales de ingeniería por medio del proceso de recubrimientos.

Este capítulo se concentra en la selección detallada de los componentes para poder desarrollar la idea propuesta, teniendo en consideración la estructura base mostrada en la Ilustración 16. En base a esto se puede desarrollar una idea de solución. La Ilustración 31 muestra un diagrama general de funcionamiento de la máquina a desarrollar.

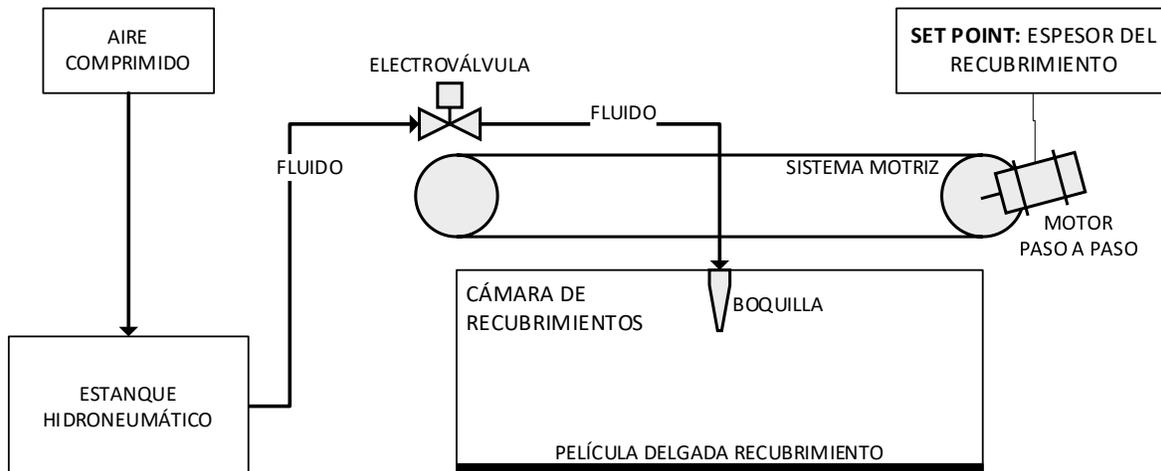


Ilustración 31: Esquema de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.

La Ilustración 32 corresponde al mecanismo propuesto, el cual consta de un tanque presurizado hidroneumático (1) utilizado para poder bombear el fluido hacía la boquilla ubicada en la zona superior, específicamente en el carro móvil (3). La función del carro móvil es deslizarse a lo largo de la cámara, alcanzando la totalidad de la superficie que se desea aplicar el recubrimiento. Este mecanismo está montado en una estructura base (2), propuesta en el capítulo anterior.



Ilustración 32: Cámara de recubrimientos propuesta. Fuente: Elaboración propia.

El mecanismo de transmisión utilizado es por poleas gemelas (4) y correa dentada. Este mecanismo es capaz de transformar el movimiento rotacional del motor en un movimiento lineal. La transmisión se lleva a cabo mediante una correa dentada, cuya finalidad es otorgar precisión en la posición del actuador hidráulico. El sistema motriz cuenta con un motor paso a paso bipolar (6), el cual tiene la ventaja de no necesitar un control de lazo cerrado para conocer la posición.

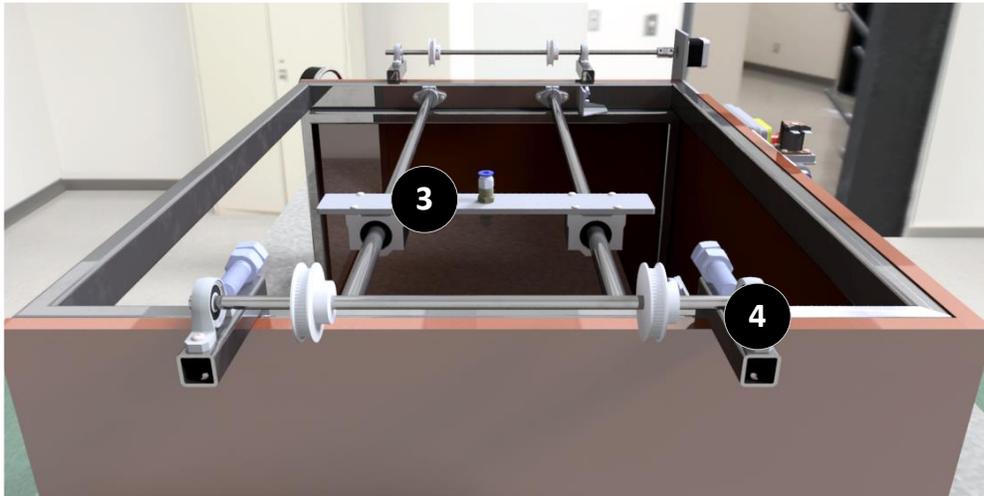


Ilustración 33: Cámara de recubrimientos propuesta. Fuente: Elaboración propia.

La caja eléctrica (5) concentra todos componentes electrónicos utilizados para llevar a cabo el funcionamiento, tales como drivers, controlador del motor paso a paso, microcontrolador, entrada eléctrica y conexión USB, utilizada para comunicación entre el microcontrolador y la interfaz gráfica de operación del equipo, cuenta además de una parada de emergencia.

El flujo entre el sustrato y la boquilla de aspersión está controlado mediante una electroválvula o solenoide (7), esta se alimenta con el fluido, desde el estanque hidroneumático y se descarga hacia la boquilla. Su función es abrir o cerrar el circuito hidráulico armónicamente con el movimiento y posición de la boquilla.

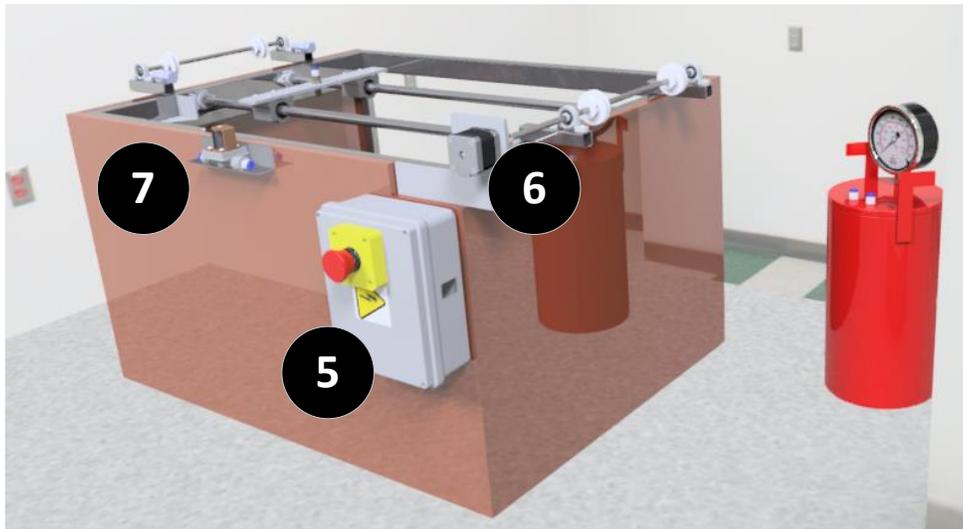


Ilustración 34: Cámara de recubrimientos propuesta. Fuente: Elaboración propia.

Una vez teniendo en cuenta la lógica de operación es necesario seleccionar los diferentes componentes para asegurar un funcionamiento óptimo del mecanismo propuesto.

3.2 Selección de boquilla de aspersión.

Para definir el tipo de boquilla a utilizar es necesario establecer parámetros de operación, comenzando por el tipo de aspersión.

TIPO DE BOQUILLA	PATRÓN DE ASPERSIÓN	TAMAÑO DE GOTA	APLICACIONES
Cono hueco	Patrón de aspersión con área de impacto en forma de anillo.	Pequeña a mediana.	Drenaje o limpieza interior de tuberías o tanques pequeños.
Cono lleno	Patrón de aspersión en forma de cono solido con área de impacto redonda.	Mediana a grande.	Lavados y enjuagues, enfriamiento de metales, supresión de polvos y protección contra fuego.
Aspersión plana	Patrón aspersión plano distribuye el líquido en forma de cortina o abanico.	Pequeña a medianas.	Recubrimientos, acabado de metales, tabletas de circuitos impresos.
Chorro solido	Patrón de aspersión circular de are redonda.	Mediana a grande.	Limpieza y lavado que requieran penetración.
Aspersión fina	Patrón cono hueco y cono lleno.	Muy pequeñas con efecto de neblina.	Humidificación, neblina ligera, enfriamiento por vapor, humectación.
Atomización con aire	Patrón plano y redondo. Intercambiable según presiones de aire-fluido.	Finas, atomización o niebla.	Aplicación de lubricante en rollos de acero, humectación

3.2.1 Capacidad de la boquilla.

La capacidad de cada boquilla depende directamente de la presión de trabajo de cada fluido. No todos los patrones de aspersión se comportan de la misma manera, existiendo parámetro denominado “*factor de capacidad*” La relación entre capacidad y presión está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{P_1^n}{P_2^n} \quad 3-3-1$$

Con:

- Q = Capacidad (lt/min).
- P = Presión del líquido (bar).
- n = Exponente según boquilla.

A continuación, se muestran los distintos valores de exponentes para cada tipo de boquilla:

Tabla 4: Factores de capacidad. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.

FACTORES DE CAPACIDAD PARA GRUPOS ESPECÍFICOS DE BOQUILLAS	
Tipo de Boquilla	Exponente "n"
Boquillas de Cono Hueco (Todas) Boquillas de Cono Lleno (Sin Vena) Boquillas de Cono Lleno (Serie 15° y 30°) Boquillas de Aspersión Plana (Todas) Boquillas de Chorro Sólido (Todas) Boquillas de Espiral (Todas)	.50
Boquillas de Cono Lleno (Estándar) Boquillas de Cono Lleno (Aspersión Cuadrada) Boquillas de Cono Lleno (Aspersión Ovalada) Boquillas de Cono Lleno (Gran Capacidad)	.46
Boquillas de Cono Lleno (Ángulo Ancho) Boquillas de Cono Lleno (Aspersión Cuadrada Ángulo Ancho)	.44

3.2.2 Gravedad específica.

La gravedad específica es la relación existente entre la masa de un volumen dado de cualquier líquido con la masa del mismo volumen en agua. El principal efecto de la gravedad específica de cada fluido se refleja en la capacidad de la boquilla.

La fórmula de gravedad específica corresponde a la siguiente ecuación:

$$GE = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \quad 3-3-2$$

Con:

ρ_{H_2O} : Densidad del agua.

ρ : Densidad del fluido.

La relación para obtener la capacidad real en cada boquilla para fluidos distintos del agua es la siguiente:

$$Cap\ liquido = Cap\ Agua * \frac{1}{\sqrt{GE}} \quad 3-3-3$$

Una representación gráfica de este fenómeno se puede observar en el Gráfico 1, cuya curva representa un factor de conversión para cada líquido.

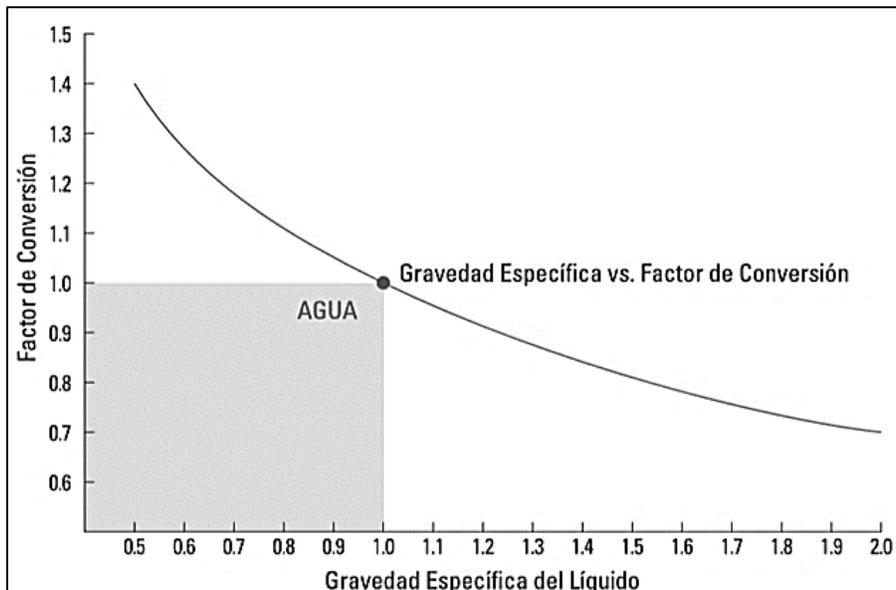


Gráfico 1: Gravedad específica vs. Factor de conversión.

La ecuación que surge de la gráfica anterior se refleja en la siguiente igualdad:

$$\text{Capacidad real boquilla} = \text{Factor de conversión} * \text{Capacidad boquilla agua}$$

Cabe destacar que es muy importante este punto, ya que muy rara vez se utiliza agua como fluido a asperjar. En el caso de esta aplicación se pretende utilizar n-TiO₂ líquido transparente, modelo AEROXIDE® TiO₂ P25 [20]. Las características del líquido se pueden observar en Tabla 5.

Tabla 5: Propiedades físicas – químicas AEROXIDE® TiO₂ P25. Fuente:[20]

Characteristic physico-chemical data		
Properties and test methods	Unit	Value
Specific surface area (BET)	m ² /g	35 - 65
pH value in 4% dispersion		3.5 - 4.5
Loss on drying* 2 hours at 105 °C	%	≤ 1.5
Tamped density*	g/l	100 - 180
Titanium dioxide based on ignited material	%	≥ 99.50
Al ₂ O ₃ content based on ignited material	%	≤ 0.300
SiO ₂ content based on ignited material	%	≤ 0.200
Fe ₂ O ₃ content based on ignited material	%	≤ 0.010
HCl content based on ignited material	%	≤ 0.300
Sieve residue (by Mocker, 45µm)	%	≤ 0.050
* ex plant The data represents typical values (no product specification)		

Los parámetros del agua en condiciones atmosféricas normales, temperatura 20°C y presión atmosférica 1 ATM son los siguientes:

Tabla 6: Propiedades del agua.

Densidad Agua	998 g/l
Viscosidad dinámica Agua	1.002 x 10⁻³ kg/m * s

Utilizando la información anterior es posible definir la gravedad específica del fluido que se debe asperjar para términos operacionales.

$$GE = \frac{180 \text{ g/l}}{998 \text{ g/l}} \approx 0.1821862348$$

Obtenida la GE es posible determinar la capacidad real de cualquier boquilla para el producto seleccionado.

3.2.3 Angulo de aspersión y cobertura.

El primer paso en la elección de la boquilla es determinar los parámetros de operación del recubrimiento. El área de trabajo está definida por el diseño estructural mencionado en el capítulo anterior en la Ilustración 16. Para efectos de selección de componentes el estudio estará basado en la Ilustración 35 y la Tabla 2 del presente documento.

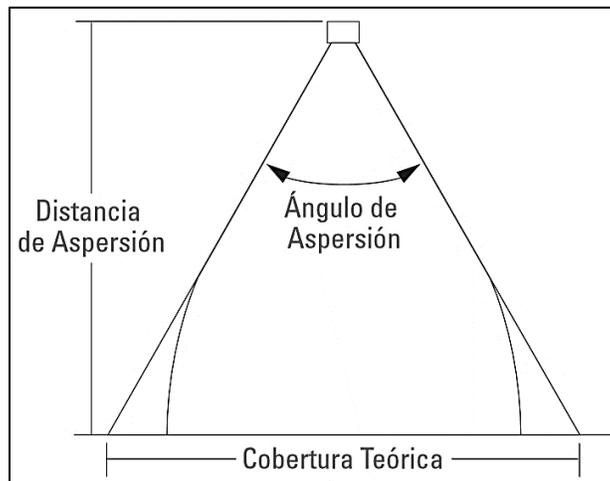


Ilustración 35: Cobertura teórica de aspersión. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.

La distancia máxima de aspersión según diseño estructural corresponde a 400 mm. Por lo tanto, teniendo los siguientes datos se procede a la elección del ángulo correspondiente.

Tabla 7: Parámetros para elección de Angulo de boquilla.

Altura estructura	400 mm
Ancho estructura	600 mm

Los datos de diseño para lograr una aplicación uniforme del recubrimiento, teniendo la posibilidad de cambiar la altura del pulverizador entre 300 a 400. El ángulo definido se refleja en la siguiente tabla:

Tabla 8: Valores de operación de boquilla.

Distancia de aspersión	300 - 400 mm
Cobertura teórica	655 - 873mm
Ángulo de aspersión	95°

3.2.4 Tamaño de gota.

Otro factor relevante corresponde al tamaño de gota. El estudio pretende realizar películas delgadas de recubrimiento, por lo tanto, no es recomendable la elección de boquillas cuyo tamaño de gota sea superior a 200 µm (micrómetros).

Tabla 9: Tamaño de gota. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.

TAMAÑO DE GOTA por Patrón de Aspersión a Diversas Presiones y Capacidades									
Tipo de Patrón de Aspersión	10 psi (0.7 bar)			40 psi (2.8 bar)			100 psi (7 bar)		
	Capacidad gpm	Capacidad l/min	DMV micrones	Capacidad gpm	Capacidad l/min	DMV micrones	Capacidad gpm	Capacidad l/min	DMV micrones
Aspersión con Aire	.005 .02	.02 .08	20 100	.008 8	.03 30	15 200	12	45	400
Aspersión Fina	.22	.83	375	.03 .43	.1 1.6	110 330	.05 .69	.2 2.6	110 290
Cono Hueco	.05 12	.19 45	360 3400	.10 24	.38 91	300 1900	.16 38	.61 144	200 1260
Aspersión Plana	.05 5	.19 18.9	260 4300	.10 10	.38 38	220 2500	.16 15.8	.61 60	190 1400
Cono Lleno	.10 12	.38 45	1140 4300	.19 23	.72 87	850 2800	.30 35	1.1 132	500 1720

- Se puede observar que, la aspersión con aire puede otorgar tamaños de gota del orden de 20 a 400 µm, pero posee un efecto adverso al recubrimiento llamado niebla.
- La aspersión fina disminuye el tamaño de gota a medida que la presión del fluido aumenta, lo que es favorable para obtener películas finas al momento de hacer recubrimientos. Otorga tamaños de gota entre 375 a 110 µm dependiendo de la presión de operación. Genera efecto niebla en su aplicación.
- La aspersión plana está en el límite del requerimiento, presentando tamaños de gotas entre 260 a 190 µm. No genera efecto niebla en su aplicación.

El patrón de aspersión a utilizar corresponde al plano, debido a que no genera niebla en el recubrimiento y posee tamaños de gotas aceptables.

3.2.5 Selección para realizar pedido a fabricante.

Dentro del catálogo del proveedor específicamente la sección C [21], boquillas de aspersión plana, existen boquillas miniatura modelo ProMax QUICKJET. Estas boquillas de aspersión tienen capacidades reales desde 0.59 lts/min hasta 3.2 lts/min como se muestra en Ilustración 36. En la Ilustración 37 es posible apreciar un ejemplo de la composición de una boquilla miniatura ProMax QUICKJET.



Ilustración 36: Boquillas de aspersión plana, miniatura ProMax Quick Veejet modelo QMVV. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.

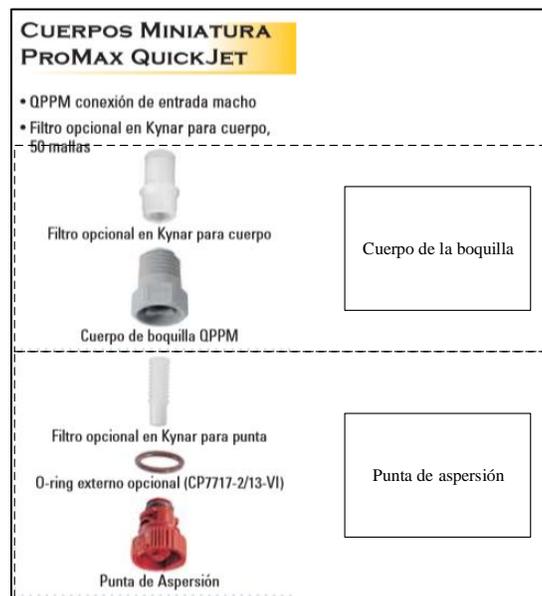


Ilustración 37: Composición de la boquilla de aspersión. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.

Considerando los puntos anteriores, ángulo de aspersión y cobertura teórica se considera la siguiente tabla del catálogo del fabricante:

Tabla 10: Datos desempeño boquillas. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.

Ángulo de Aspersión a 3 bar	Punta Tipo Quick VeeJet							Tamaño	Equiv. Diam. Orificio (mm)	Capacidad (litros por minuto)*															Ángulo de Aspersión (°)*			
	QSVV	QVVA	QSU	QUA	QLUA	QMVV	QPTA			0.4	0.7	1.5	2	3	4	6	7	12†	15††	20	1.5	3	6	15				
	95°	●	●								01	.66	.14	.19	.28	.32	.39	.46	.56	.60	–	.88	1.0	81	95	105	113	
		●						015	.81	.22	.29	.42	.48	.59	.68	.84	.90	1.2	1.3	1.5	82	95	105	113				
		●						02	.91	.29	.38	.56	.64	.79	.91	1.1	1.2	1.6	1.8	2.0	82	95	105	113				
		●						03	1.1	.43	.57	.84	.97	1.2	1.4	1.7	1.8	2.4	2.6	3.1	83	95	104	111				
		●						04	1.3	.58	.76	1.1	1.3	1.6	1.8	2.2	2.4	3.2	3.5	4.1	84	95	103	108				
		●						05	1.4	.72	.95	1.4	1.6	2.0	2.3	2.8	3.0	3.9	4.4	5.1	84	95	102	107				
		●						06	1.5	.86	1.1	1.7	1.9	2.4	2.7	3.4	3.6	4.7	5.3	6.1	86	95	101	106				
		●						08	1.8	1.2	1.5	2.2	2.6	3.2	3.6	4.5	4.8	6.3	7.1	8.2	87	95	100	105				
			●	●			●	10	2.0	1.4	1.9	2.8	3.2	3.9	4.6	5.6	6.0	–	8.8	10.2	89	95	100	105				
			●	●			●	15	2.4	2.2	2.9	4.2	4.8	5.9	6.8	8.4	9.0	–	13.2	15.3	90	95	100	105				
			●	●			●	20	2.8	2.9	3.8	5.6	6.4	7.9	9.1	11.2	12.1	–	17.7	20	90	95	100	105				
			●	●			●	30	3.4	4.3	5.7	8.4	9.7	11.8	13.7	16.8	18.1	–	26	31	91	95	101	105				
			●	●			●	40	3.8	5.8	7.6	11.2	12.9	15.8	18.2	22	24	–	35	41	92	95	100	105				
			●	●			●	50	4.4	7.2	9.5	14.0	16.1	19.7	23	28	30	–	44	51	93	95	99	103				
			●	●			●	60	4.8	8.6	11.4	16.8	19.3	24	27	34	36	–	53	61	93	95	99	103				
			●	●			●	70	5.2	10.1	13.3	19.5	23	28	32	39	42	–	62	71	93	95	99	103				
				●				100	6.2	14.4	19.1	28	32	39	46	56	60	–	88	102	93	95	99	102				
		●						150	7.5	22	29	42	48	59	68	84	90	–	132	153	93	95	99	102				

De la tabla Tabla 10, utilizando un ángulo de aspersión de 95° se pueden obtener coberturas teóricas del orden de 655mm a 873mm, considerando 300mm a 400mm de altura respectivamente. Debido a que el espesor deseado parte desde 10 µm y el modelo de boquilla de aspersión plana corresponde al modelo QMVV, es preciso escoger la boquilla de menor tamaño, siendo la que posee tamaño 015 con un diámetro de orificio equivalente de 0.81mm.

Capacidad real utilizando AEROXIDE® TiO2 P25 como fluido a asperjar:

$$Cap_{AEROXIDE® TiO2 P25} = 0.59 \text{ l/min} * \frac{1}{\sqrt{0.1821862348}}$$

$$Cap_{AEROXIDE® TiO2 P25} = 1.38 \text{ l/min}$$

Tabla 11: Datos de boquilla seleccionada. Fuente: Elaboración propia.

Ángulo de aspersión	95°
Punta Quick Vejeet	QMVV
Tamaño	015
Diámetro orificio	0.81 mm
Capacidad agua	0.59 lt/min
Capacidad real n-TiO2	1.38 lt/min

Estándar	Tipo de Boquilla	Longitud (mm)	Hex. (mm)	Ancho (mm)	Peso Neto (kg)
	QPPM+QMVV	30	15.9	–	.003

Ilustración 38: Datos de la boquilla. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.

Para realizar el pedido de la boquilla se debe formar el código del producto. El ejemplo para realizar pedidos se muestra en la Ilustración 39.

BOQUILLA COMPLETA PROMAX QUICK VEEJET					
CUERPO DE BOQUILLA			PUNTA DE ASPERSIÓN		
1/4	QPPM	+	QMVV	50	02
Conexión Entrada	Cuerpo de Boquilla		Tipo de Punta	Ángulo de Aspersión	Tamaño

Ilustración 39: Ejemplo para realizar pedido al proveedor de boquillas. Fuente: Catálogo 70M de Spraying System Co ®.

Finalmente, con los datos obtenidos en el catálogo 70M y basándose en los requerimientos operacionales del trabajo a realizar, es posible obtener el código para realizar pedido al distribuidor Spraying System Co ®.

Código boquilla seleccionada:

$\frac{1}{4}$ QPPM + QMVV 95 015

Ilustración 40. Código para realizar pedido boquilla seleccionada. Fuente: Elaboración propia.

3.3 Mecanismo de transmisión.

Para seleccionar el mecanismo de avance a utilizar en el diseño, se comparan 2 mecanismos de transmisión diferentes, para esto la comparación se basa en el análisis de las velocidades lineales que pueden generar dos tipos de transmisiones que generan desplazamientos lineales a partir de la velocidad angular de un motor.

3.3.1 Velocidad de avance de un tornillo sin fin.

La velocidad lineal que se puede generar en un mecanismo con un sistema de tornillo sin fin se puede apreciar por la siguiente ecuación:

$$V_a = \frac{P * e * n}{60} \quad 3-4$$

Donde:

V_a : Velocidad lineal de un sistema de transmisión por tornillo en m/s.

P : Paso del husillo en m.

e : Número de entradas del tornillo.

n : RPM del motor.

3.3.2 Velocidad de avance de un sistema por correas con poleas gemelas.

La velocidad lineal que se puede generar en un mecanismo con un sistema de correas conducido por poleas gemelas se puede apreciar por la siguiente ecuación:

$$V_t = \frac{n * \pi * d}{60} \quad 3-5$$

Donde:

V_t : Velocidad lineal de un sistema de transmisión por correas en m/s.

n : RPM del motor.

d : Diámetro medio de la polea en m.

Analizando las fórmulas 3-4 y 3-5, es posible inferir que las velocidades son muy diferentes. Siendo el husillo el sistema más lento y la transmisión por correas poleas la más robusta para velocidades altas. Por tanto, el sistema de transmisión seleccionado corresponde al último de estos mencionados. Basándose en la ecuación 3-5, la velocidad es directamente proporcional al diámetro de la polea. Es decir, a mayor diámetro de poleas, mayor velocidad tangencial. Por lo tanto, es más útil trabajar con un amplio espectro de velocidades, así se pueden generar diferentes niveles de recubrimiento. En su mayoría el tornillo sin fin es utilizado para transmisión de potencia y para controlar posiciones mas

exactas, teniendo como desventaja sobre el uso de poleas gemelas poder desarrollar velocidades de avance altas.

3.4 Velocidad lineal del pulverizador.

La velocidad del desplazador lineal, el cual será portador de la boquilla de aspersión, debe ser la variable de estudio a controlar, así será posible asegurar la producción de una capa uniforme sobre el sustrato. Esta variable depende de dos parámetros de operación: espesor del recubrimiento y caudal entregado por cada boquilla.

El esquema mostrado en la Ilustración 41 hace referencia de la posición y sistema de transmisión utilizado para mover la boquilla de aspersión.

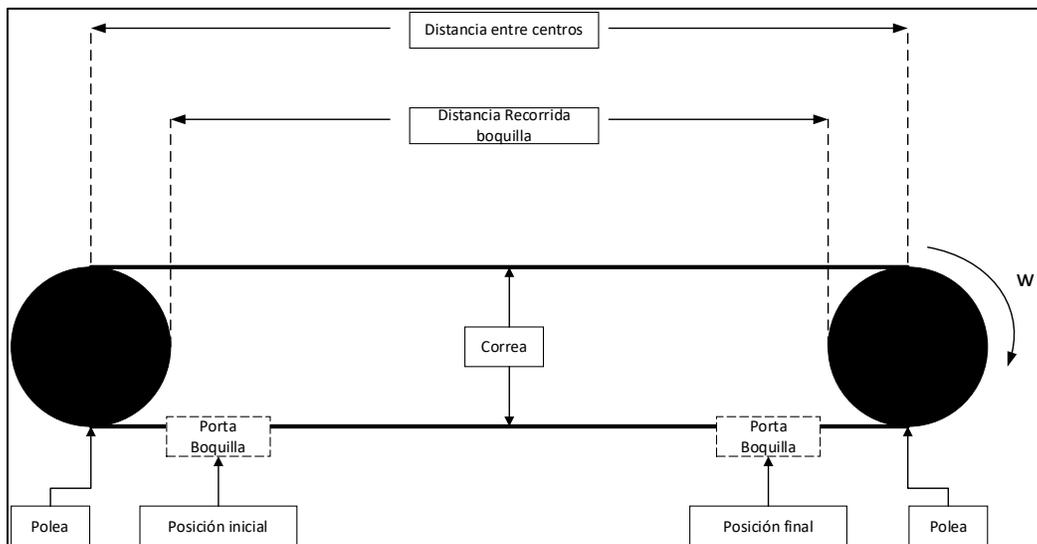


Ilustración 41: Diagrama esquemático sistema transmisión de la boquilla. Fuente: Elaboración propia.

A partir del diseño presentado al inicio de este capítulo, se definirán algunos parámetros del sistema mecánico:

Tabla 12: Distancias sistema de transmisión. Fuente: Elaboración propia.

Distancia entre centros	89 cm
Distancia recorrido boquilla	67 cm
Diámetro polea	0,377 cm

La ecuación 3-3-6 de define el tiempo de exposición teórico del pulverizado, según el volumen necesario a depositar:

$$T_{spray} = \frac{V_{recubrimiento} * 60}{Q} \quad 3-3-6$$

Donde:

T_{spray} : Tiempo de exposición al pulverizado en segundos.

$V_{recubrimiento}$: Volumen del recubrimiento en litros.

Q : Caudal real de la boquilla en litros/min.

La velocidad lineal del carro pulverizador está definida por la ecuación 3-7:

$$V = \frac{d}{T_{spray}} \quad 3-7$$

Donde:

V : Velocidad lineal del pulverizador.

d : Distancia recorrida del pulverizador.

En el Gráfico 2 se muestra la relación que existe entre la velocidad lineal del pulverizador y el tiempo de exposición del pulverizado. Utilizando n-TiO₂ como fluido y caudal real de la boquilla $Q = 1.38$ lt/min.

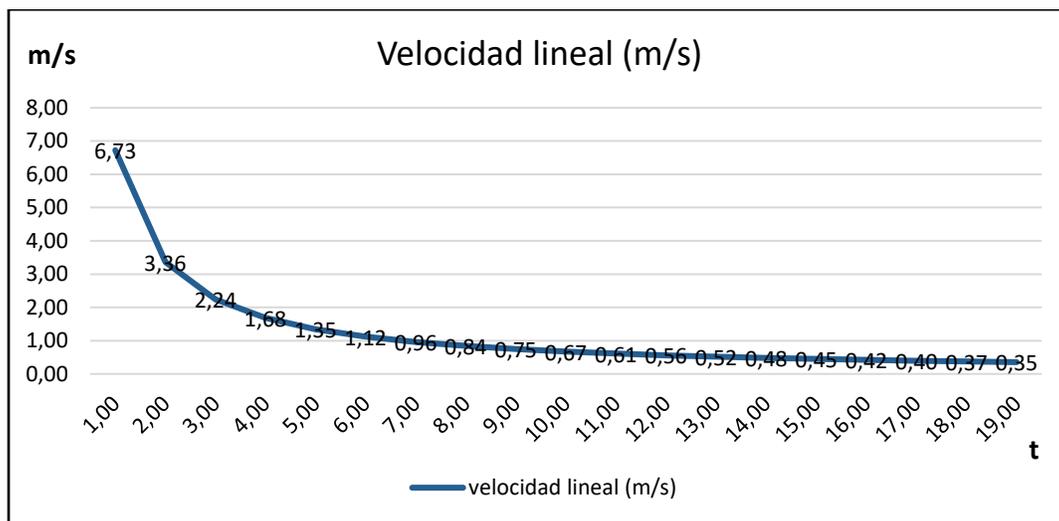


Gráfico 2: Relación del tiempo de pulverizado vs velocidad lineal.

3.5 Velocidad máxima del motor.

Es preciso determinar la velocidad máxima a la cual estará sometido el motor principal, como se pudo observar en el apartado anterior, la velocidad de avance de un sistema por correas gemelas es muy sensible a variaciones del diámetro de la polea conductora. En el mercado, existen diferentes medidas de poleas dentadas [22], para lo cual el análisis utiliza la polea modelo GT2-60 (Ilustración 42) la que posee un diámetro medio de 37mm e interno (para el eje) de 8mm.

Utilizando la Tabla 22 disponible en anexo 9.4 y despejando n de la ecuación 3-5, es posible determinar diferentes velocidades necesarias para obtener espesores propuestos, sin que éstas superen las RPM máximas de un motor paso a paso. Se observa que para alcanzar espesores desde 0,006 mm es necesario utilizar una velocidad lineal de 3,36 m/s. Para obtener las RPM máximas requeridas para la configuración de transmisión descrita anteriormente se utiliza la siguiente expresión:

$$n = \frac{V_t * 60}{\pi * d}$$
$$n = 1703 \text{ RPM}_{max}$$

Donde 1703 RPM corresponde a la máxima velocidad angular que debe desarrollar el motor, para así asegurar un espesor mínimo de capa en el recubrimiento de 0,006 mm.



Ilustración 42: Polea GT2-60. diámetro eje 8mm.

3.6 Selección eje lineal.

Otro punto importante en el mecanismo de transmisión corresponde al eje en el cual se desplazará el sistema pulverizador. Este eje de largo $L = 800$ mm, cuya medida fue propuesta en el diseño estructural del sistema, debe ser optimizado en el ámbito mecánico, ya que será sometido a esfuerzos de flexión.

En el mercado es posible encontrar ejes fabricados de acero inoxidable martensítico, de diferentes diámetros establecidos. Las propiedades del acero utilizado para este tipo de aplicaciones están dadas por la Tabla 13.

Tabla 13: Propiedades de acero inoxidable martensítico 304. Fuente: CES EduPack 2018

Propiedades físicas	
Densidad	7.85e3 - 8.06e3 Kg/m ³
Propiedades mecánicas	
Módulo de Young	190 – 2013 Gpa
Límite elástico	205 – 310 Mpa
Rigidez específica	23.8 – 25.6 MN.m/kg
Resistencia a la tracción	510 – 620 Mpa

Utilizando el software de simulación *Autodesk Inventor 2017*®, Se realizaron pruebas de flexión en ejes de diferentes diámetros (Tabla 14), comercializados actualmente. De las simulaciones se obtuvieron los siguientes resultados:

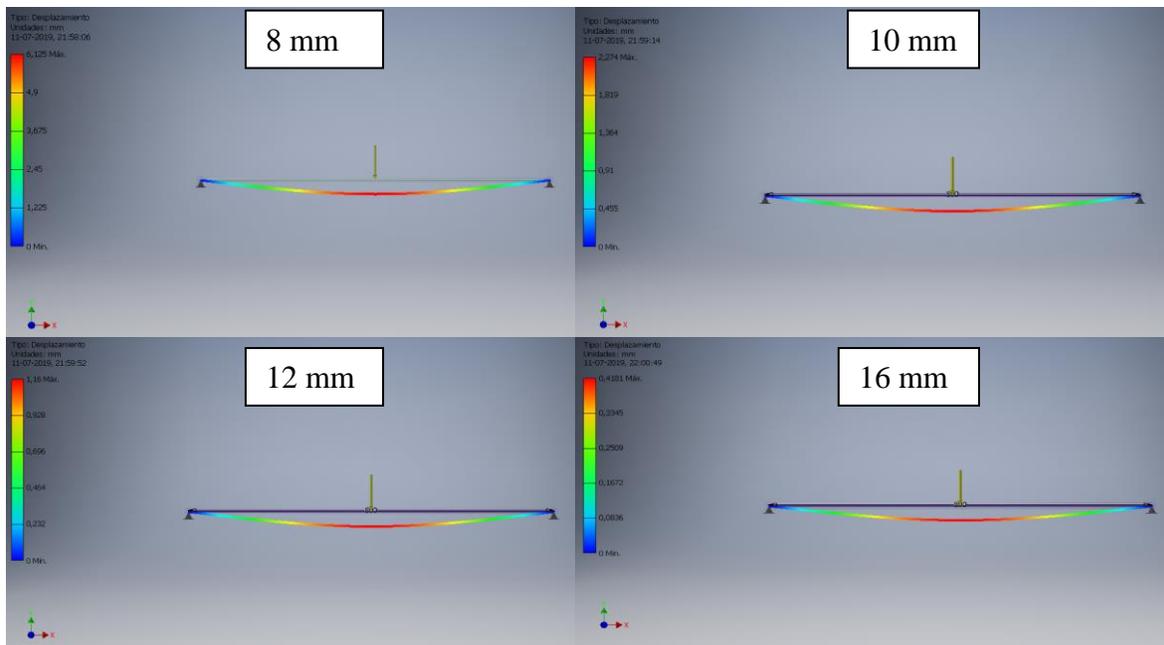


Ilustración 43: Simulación del desplazamiento de un eje con diámetro: 8mm, 10mm, 12mm, 16mm con una carga de 2kg en L/2.

Tabla 14: Resultados de deformación máxima en ejes. Fuente: Elaboración propia.

Diámetro eje	8 mm	10 mm	12 mm	16 mm
Deformación [mm] máx.	6,125 mm	2,274 mm	1,16 mm	0,4181 mm

De las simulaciones mostradas anteriormente, el eje que mejor desempeño obtuvo frente a cargas flectoras que pueden estar presentes en la máquina, corresponde al eje de 16 mm de diámetro. Este eje presenta un desplazamiento máximo de tan solo 0.4 mm, cuya tolerancia es admisible para la aplicación en desarrollo.

3.7 Rodamiento lineal.

Una vez seleccionado el eje lineal a utilizar, ya es posible seleccionar el rodamiento lineal, cuya finalidad es otorgar un desplazamiento libre al carro porta boquilla, otorgando una carga mínima debido a la fricción entre las superficies móviles. Analizando los requerimientos del sistema, el rodamiento que presenta mejor adaptación física corresponde a mostrado en la Ilustración 44 correspondiente al modelo SC16UU.



Ilustración 44: Rodamiento lineal SC16UU. Fuente: www.chimech3d.cl

3.7.1 Cálculo de la duración de vida de un rodamiento lineal.

El cálculo de la vida de un rodamiento es un punto para tener en consideración en el mantenimiento preventivo de la maquinaria. Para asegurar así un óptimo funcionamiento y por cierto un buen acabado en los recubrimientos a realizar.

$$L = \left(\frac{C}{F_m} * f_H * f_t * f_s \right)^3 * 10^5$$

$$L_h = \frac{L}{2 * s * n_s * 60}$$

Con:

L : Duración de la vida útil en metros (m).

L_h : Duración de la vida útil en horas (h).

C : Capacidad de carga dinámica (N).

F_m : Carga dinámica equivalente (N).

f_H : Factor de dureza para ejes.

f_t : Factor de temperatura.

f_s : Factor de carrera corta.

s: Longitud de carrera (m).

n_s : Frecuencia de ciclo (1 ciclo = 2 carreras) (min^{-1}).

Con:

f_H : 0.5

f_t : 0.85

f_s : 1

C: 420 N

n_s : 30

Es necesario calcular la carga dinámica equivalente para cada rodamiento, en este caso 2.

$$F_m = \frac{40N}{2} = 20N$$

$$L = \left(\frac{420 [N]}{20 [N]} * 0.5 * 0.85 * 1 \right)^3 * 10^5$$

Según los parámetros mencionados anteriormente la duración en metros del rodamiento corresponde a:

$$L = 710 * 10^5$$

La capacidad de carga dinámica se calcula mediante la siguiente relación:

$$C_{req} = \frac{F_m}{f_H * f_t * f_s * f_L}$$

Con:

f_L : Factor de duración de vida.

Se procede a calcular la carga dinámica, con los siguientes datos:

Si la carrera en los rodamientos lineales es menor a tres veces la longitud de los rodamientos, estamos frente a una carrera corta. Aquí la duración de vida del eje es inferior a la de los rodamientos. Para una carrera mayor a tres veces la longitud del rodamiento lineal corresponde un factor de carrera corta $f_s = 1$.

Para este caso:

$$f_L = 0.125$$

$$C_{req} = \frac{20}{0.5 * 0.85 * 1 * 0.125}$$

$$C_{req} = 377 [N]$$

Tabla 15: Factor de temperatura. Fuente: www.rodavigo.cl

Temperatura del rodamiento (°C)	100	125	150	175	200
Factor de temperatura f_t	1	0,92	0,85	0,77	0,70

El último paso es verificar la vida útil en horas. Para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$L_h = \frac{L}{2 * s * n_s * 60}$$

Reemplazando con los valores obtenidos de los cálculos anteriores:

$$L_h = \frac{710 * 10^5}{2 * 0.8 * 30 * 60}$$

$$L_h = 24653 \text{ hrs}$$

El tiempo máximo de duración de los rodamientos sería 24653 horas de uso.

3.8 Cálculo de longitud de la correa.

Teniendo en cuenta los componentes ya seleccionados, es posible determinar el largo exacto de la correa que se utilizará para realizar el movimiento lineal del carro porta boquilla. Considerando la Ilustración 41 y los siguientes datos:

Modelo polea	GT2-60. diámetro eje 8mm
Distancia entre centros	89 cm
Distancia recorrido boquilla	67 cm
Diámetro polea	0,377 cm
Paso polea	2 mm

La longitud de la correa está determinada por la siguiente expresión:

$$L_c = 2E + \frac{\pi}{2}(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4E}$$

Donde:

- L_c : Longitud de la correa.
- E : Distancia entre centros.
- D : Diámetro de la polea mayor.
- d : Diámetro de la polea menor.

Reemplazando los valores:

$$L_c = 2 * 89(cm) + \frac{\pi}{2}(0.377(cm) + 0.377(cm)) + \frac{((0.377(cm) - 0.377(cm)))^2}{4 * 89(cm)}$$

$$L_c = 179.2 \text{ cm.}$$

El largo por cada correa corresponde a 179.2 cm. Considerando que se utilizan 2 juegos de poleas en el mecanismo propuesto el largo total para realizar pedido corresponde a:

$$2 * L_c = 358.4 \text{ cm.}$$

3.9 Selección del motor.

3.9.1 Carga lineal.

Corresponde a la fuerza ejercida sobre las guías lineales, la que se produce por la masa del carro porta boquilla del mecanismo.

$$F_p = W = m * g \quad 3-8$$

Donde:

F_p: Fuerza peso (N).

m: Masa del objeto a mover (carro porta boquilla) (kg).

g: Aceleración de gravedad (m / s²).

Para efectos de cálculos se asumen las siguientes constantes, basados en el diseño propuesto al inicio de la sección:

m: 1 kg.

$$W = 1 [kg] * 9.81 [m / s^2] \quad 3-9$$

$$W \approx 10 [N] \quad 3-10$$

3.9.2 Inercia total del sistema.

Una vez teniendo la carga que se desea mover con el motor, se debe realizar la sumatoria de inercias involucrados. Siguiendo la siguiente ecuación de inercia total:

$$J_{total} = J_{motor} + J_{reduc} + \frac{J_{poleas} + J_w}{i^2} \quad 3-11$$

Donde:

- J_{motor} : Inercia motor.
- J_{reduc} : Inercia de los reductores.
- J_{poleas} : Inercia de las poleas.
- J_w : Inercia de la carga.
- i : Relación de transmisión.

En este caso particular J_{reduc} es nulo, debido que en el mecanismo de transmisión diseñado no existen reductores.

J_{poleas} corresponde a la inercia perteneciente a las poleas, previamente seleccionadas. A lo cual la expresión que las define es la siguiente:

$$J_{poleas} = (\pi * L * \rho * r^4) \quad 3-12$$

Donde:

- L : Espesor de la correa (m).
- ρ : Densidad material de la correa ($\frac{kg}{m^3}$).
- r : Radio de las poleas (m).

Reemplazando en la ecuación anterior los valores utilizados:

$$J_{poleas} = \left(\pi * 0.006 [m] * 850 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 0.001885 [m]^4 \right)$$

$$J_{poleas} = 2.023 \times 10^{-10} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

Teniendo en cuenta que el sistema posee 4 poleas el valor anterior debe ser multiplicado por la cantidad de poleas.

$$J_{poleas} = (2.023 \times 10^{-10} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2) * 4$$

$$J_{poleas} = 8.091 \times 10^{-10} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

La inercia de la carga debe ser calculada mediante la siguiente expresión:

$$J_w = (m * r^2) \quad 3-13$$

Reemplazando la expresión anterior por los valores indicados anteriormente queda:

$$J_w = (1 [kg] * 0.001885 [m]^2)$$

$$J_w = 1.885 \times 10^{-3} \text{ Kg.m}^2$$

De esta manera es posible realizar el cálculo de la inercia total del sistema, realizando la sumatoria de las inercias calculadas anteriormente.

$$J_{total} = J_{motor} + J_{reduc} + \frac{J_{poleas} + J_w}{i^2}$$

$$J_{total} = 6.8 \times 10^{-6} + 0 + \frac{8.091 \times 10^{-10} + 1.885 \times 10^{-3}}{1} \text{ Kg.m}^2$$

$$J_{total} = 1.892 \times 10^{-3} \text{ Kg.m}^2$$

3.9.3 Torque total del sistema.

Una vez teniendo la sumatoria de inercias, es necesario realizar la sumatoria de torques, lo que está expresado por la siguiente ecuación:

$$T_{total} = T_{resis} + T_{acel} \quad 3-14$$

El torque de aceleración debe ser capaz de vencer la inercia del sistema. Se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$T_{acel} = \frac{J_{total} * RPM * 2 * \pi}{60} \quad 3-15$$

Reemplazando los valores en la formula del Torque de aceleración:

$$T_{acel} = \frac{1.892 \times 10^{-3} \text{ Kg.m}^2 * 1703 * 2 * \pi}{60}$$

$$T_{acel} = 0.0337379 \text{ N.m}$$

El torque de resistencia existe debido a las resistencias existentes debido a fricción el que en este caso tiene un coeficiente de 0.05, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T_{resis} = \frac{F_{total} * r}{i} \quad 3-16$$

Con

$$F_{total} = \mu * W * \cos(\theta)$$

$$F_{total} = 0.05 * 10 \text{ N} * \cos(0)$$

$$F_{total} = 0.5 \text{ [N]}$$

$$T_{resis} = \frac{0.5 \text{ [N]} * 0.001885 \text{ [m]}}{1}$$

$$T_{resis} = 9.425 \times 10^{-4} \text{ [N.m]}$$

Realizando la sumatoria de los torques del sistema:

$$T_{total} = T_{resis} + T_{acel}$$

$$T_{total} = 9.425 \times 10^{-4} + 0.0337379 \text{ [N.m]}$$

$$T_{total} = 0.0346804 \text{ [N.m]}$$

Teniendo el toque total del sistema es posible dimensionar el motor eléctrico para mover la carga sin que genere problemas. Por lo tanto, motor del sistema debe cumplir con las siguientes características:

Tabla 16: Valores motor requerido.

Variable	Valor
RPM max	1703 RPM
Torque	0.0346804 [N.m]

El motor seleccionado, con capacidad de suministrar el torque suficiente al sistema motriz, corresponde a: Stepper bipolar NEMA 17, modelo MS17HD6P4050 (4.5 V, 1.5 A, 67 N-cm, 1.8°), cuyo torque máximo es 0.67 [N.m]. Las curvas de torque para este modelo de motor en particular se pueden revisar en la Ilustración 45.

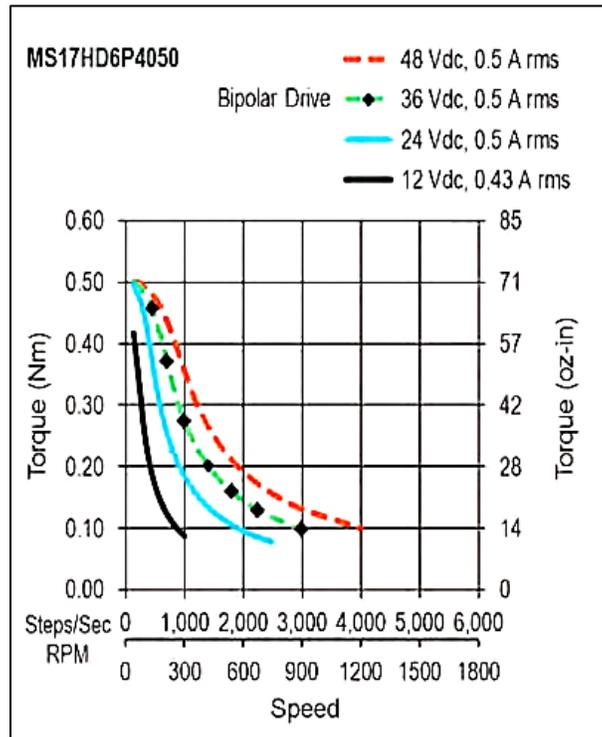


Ilustración 45: Curva Torque-RPM motor paso a paso Nema 17 MS17HD6P4050. Fuente: www.moonsindustries.eu

3.10 Sistema de bombeo.

Para poder transportar el fluido a utilizar en el proceso de recubrimiento, es necesario diseñar un mecanismo capaz de soportar cualquier tipo de químico, ya sea resina, cerámicos u otros compuestos. Para ello se propone el siguiente diseño de bombeo hidroneumático, que consta principalmente de dos compartimientos en su interior:

- a) **Masa aire comprimido:** Ocupa la mayor parte de del tanque y se rellena a medida que la presión disminuya.
- b) **Masa del fluido a utilizar:** Está en el interior de un recipiente interno al tanque, el cual puede ser removido e intercambiable. La salida a presión del tanque debe estar sumergida en este recipiente.

El sistema hidroneumático diseñado consta de una entrada, por la cual se introduce aire comprimido al tanque. La salida debe estar en contacto directo con el fluido utilizado para realizar el recubrimiento. Además, posee una conexión para montaje de un manómetro, así poder tener una visión de la presión de operación y obtener resultados favorables en el proceso del recubrimiento. En la Ilustración 46 es posible observar el diseño.

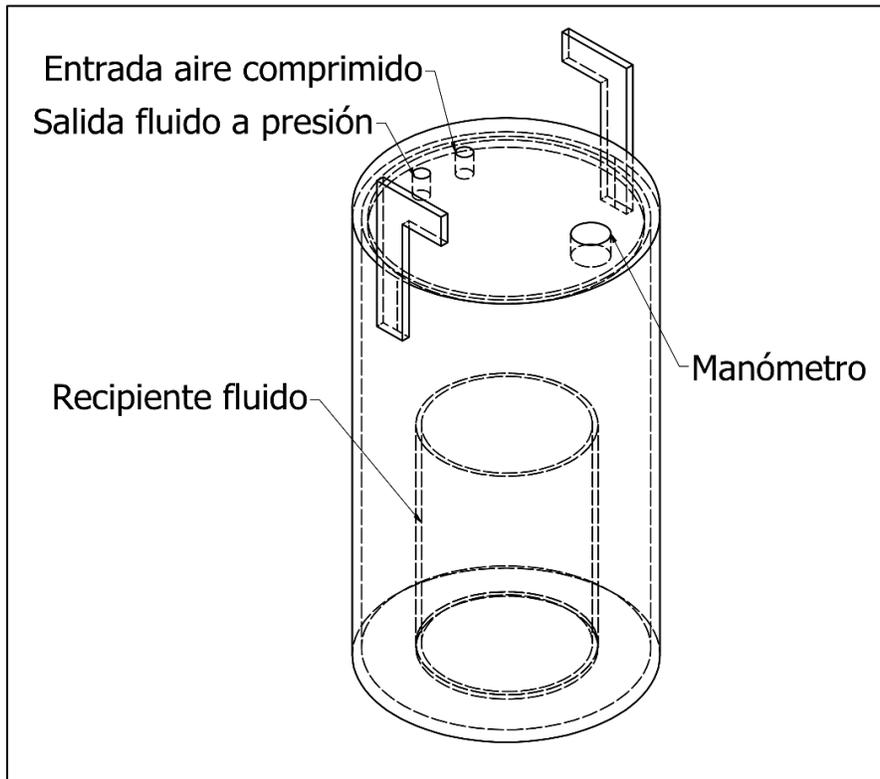


Ilustración 46: Tanque hidroneumático. Fuente: Elaboración propia.

La Ilustración 47 muestra una vista de cada componente del sistema de bombeo a utilizar, ofrece una vista explosionada.



Ilustración 47: Tanque hidroneumático, vista explosionada. Fuente: Elaboración propia.

La operación del tanque hidroneumático debe regirse bajo ciertos parámetros, los que deben asegurar el buen funcionamiento del sistema.

Según el fabricante de la boquilla de aspersión, necesita una presión mínima de operación, directamente proporcional a la presión del fluido, se ve interferido el caudal (Q) otorgado. De esta manera se establecen los siguientes parámetros obtenidos de [21]:

Tabla 17: Datos de operación boquilla seleccionada para diseño.

Elemento	Presión de operación	Caudal (n-TiO ₂)
Boquilla seleccionada 1/4	3 bar	1,38 L/min

El sistema de bombeo debe cumplir con una presión de operación fija en la boquilla, para asegurar un buen funcionamiento del componente seleccionado y cumplir con el caudal especificado por el fabricante, por esta razón es necesario evaluar presiones internas en el estanque y analizar si el diseño establecido cumple con los análisis mecánicos. El material seleccionado para la fabricación es acero al carbono, cuyas propiedades mecánicas son las siguientes:

Tabla 18: Propiedades físicas acero al carbono SAE1020. Fuente: CES EduPack 2018

Módulo de Young	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,29
Modulo cortante	79700,000 MPa
Densidad	7,850 g/cm ³

Una vez seleccionado el material a utilizar, el siguiente paso es declarar las presiones internas a las cuales estará sometido el estanque. Cabe señalar que la presión necesaria para operación es de 3 [bar]. Por lo cual se debe realizar pruebas de esfuerzo y deformación para cargas de diferente magnitud.

En la Ilustración 48 es posible apreciar las cargas internas declaradas en el tanque. El primer análisis corresponde a presiones internas 3 [Bar].

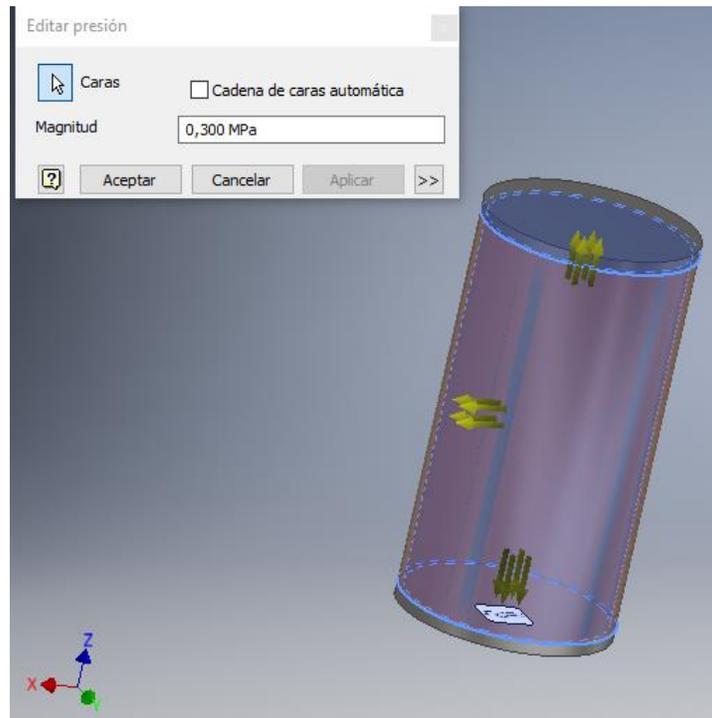


Ilustración 48: Declaración de cargas internas del tanque. Fuente: Elaboración propia.

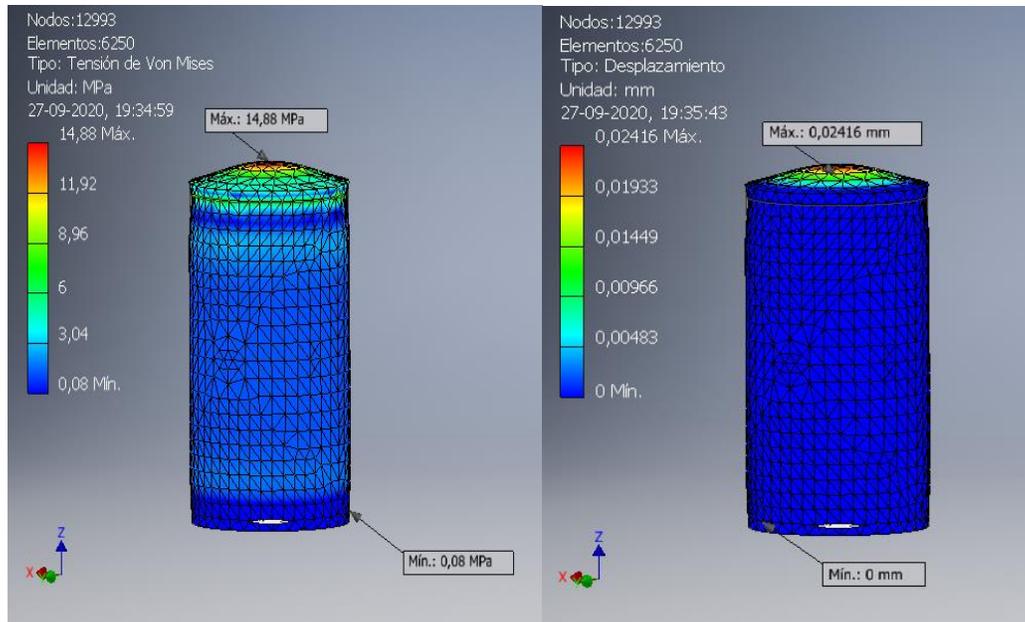


Ilustración 49: Resultado de esfuerzos y deformación, presión interna 3 bar. Fuente: Elaboración propia.

Carga MPa	0.3	0.4	0.8	1	2
Esfuerzo máx. [MPa]	14.88 MPa	19.83 MPa	36.67 MPa	49.58 MPa	99.17 MPa
Deformación [mm] máx.	0.02416 mm	0.03221 mm	0.06442 mm	0.08053 mm	0.1611 mm

Concluyendo de las pruebas realizadas anteriormente en el tanque hidroneumático, es posible asegurar la resistencia del material y la forma que posee el estaque, resistiendo dentro de límites normales a presiones hasta 20 Bar, y cuya presión nominal será de 3 Bar.

3.11 Ensamble del mecanismo transmisión.

El diseño estructural del prototipo se realizó mediante el software de simulación 3D Inventor. Basándose en los requerimientos planteados anteriormente se desarrolló una propuesta de diseño. Cada una de las partes se definen en la Tabla 19.

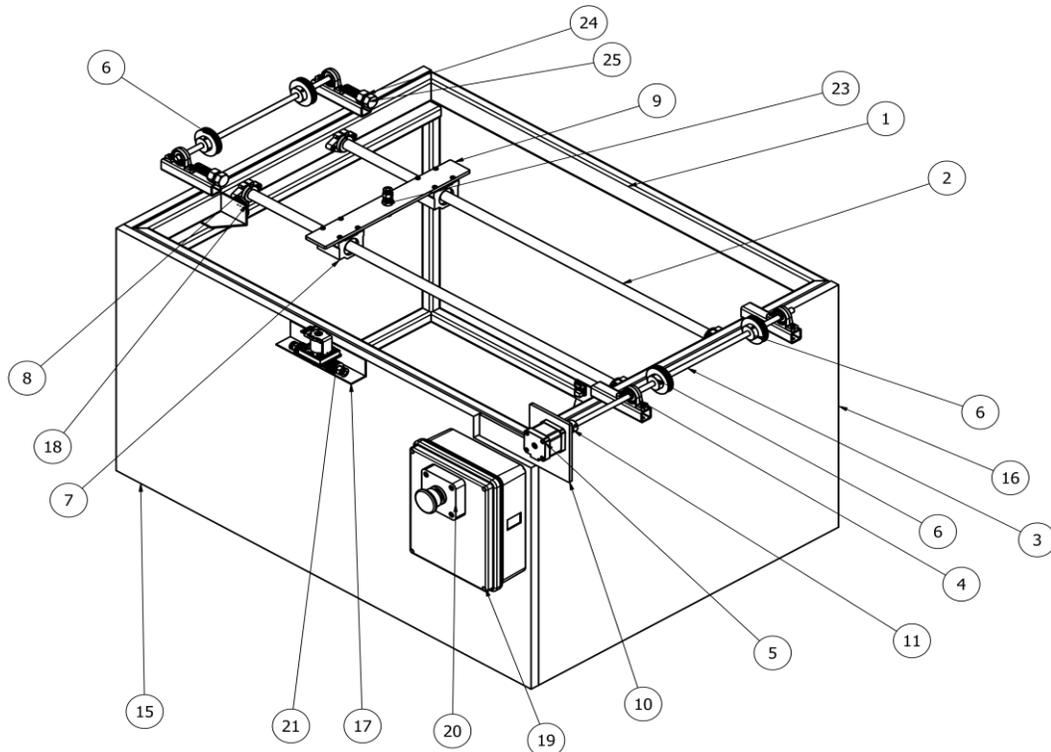


Ilustración 50: Mecanismo pulverización propuesto. Fuente: Elaboración propia.

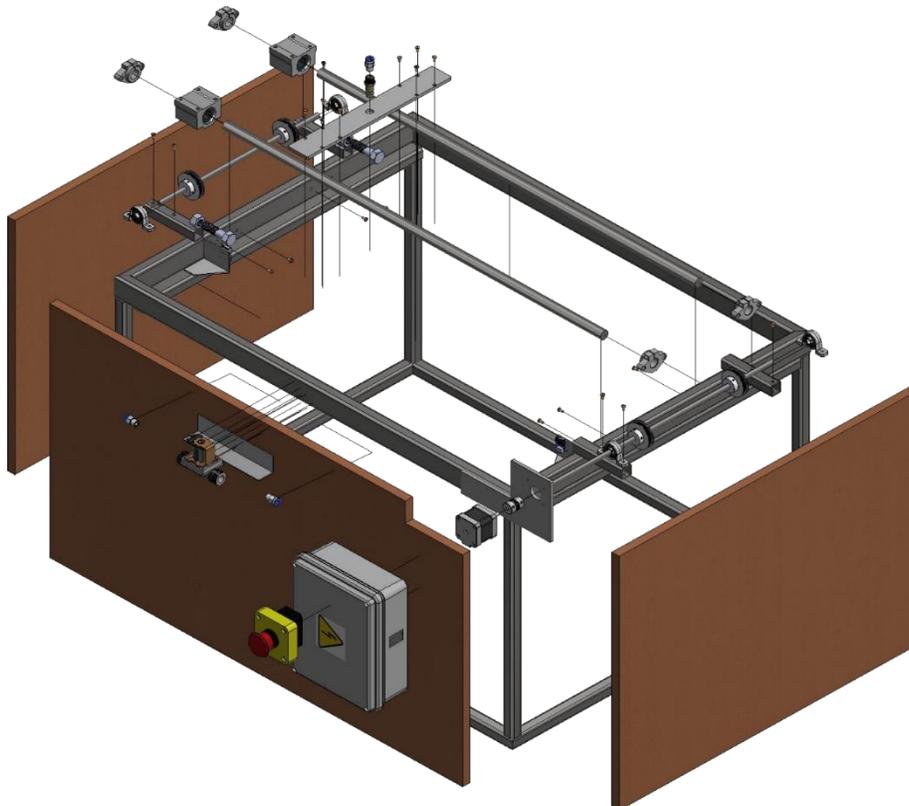


Ilustración 51: Mecanismo pulverización propuesto, vista explosionada. Fuente: Elaboración propia.

El diseño propuesto contempla tres grupos de elementos, cada uno a las siguientes categorías: Sistema mecánico, sistema hidroneumático y sistema electrónico, de los cuales ya fueron calculados en los capítulos anteriores, haciendo posible el ensamble de cada componente, los que en conjunto forman el sistema de pulverizado propuesto.

Los componentes necesarios para la fabricación sistema de pulverización se muestran en la Tabla 19

Tabla 19: Elementos del sistema de pulverización propuesto. Fuente: Elaboración propia.

ÍTEM	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	1	Estructura base	Perfil acero carbono 20x40x2mm SAE1020
2	2	Eje lineal 16 mm	Acero inoxidable martensítico 304
3	1	Eje lineal 8mm	Acero inoxidable martensítico 304
4	4	Soporte de pie con rodamiento de bolas KP08	Aluminio
5	1	Motor paso a paso NEMA17	
6	4	Polea dentada GT2-60 diámetro interno 8mm	Aluminio
7	2	Rodamiento lineal SC16	Aluminio
8	4	Soporte ovalado SHF16	Aluminio
9	1	Soporte superior para boquilla	Acero al carbono SAE1020
10	1	Soporte motor	Acero al carbono SAE1020
11	1	Copla flexible 5x8mm	Aluminio
12	1	Soporte final de carrera 1	Aluminio
13	1	Soporte final de carrera 2	Aluminio
15	1	Tapa trasera	Terciado 8mm
16	2	Tapa lateral	Terciado 8mm
17	1	Soporte solenoide	Aluminio
18	2	Interruptor fin de carrera 3pin	
19	1	Caja Eléctrica IP-64 165x210x80	Acrílico
20	1	Parada de emergencia	
21	1	Electroválvula 12 V	Bronce
23	1	Niple porta boquilla ¼	Bronce
24	2	Tuerca tensora correa	M8 zincado
25	2	Perno tensor correa	Zincada hexagonal 8mm

4 Construcción.

En este capítulo se presentan las etapas de la construcción del prototipo diseñado. Se mostrarán los diferentes procesos de fabricación a los cuales fueron sometidos los distintos elementos diseñados en el capítulo anterior.

4.1 Estructura base.

La estructura base corresponde al elemento principal para el ensamble de los diferentes componentes del sistema. Fue diseñado para ser fabricado en perfil cuadrado y rectangular de 20x20x3mm y 20x40x3mm respectivamente, utilizando acero al carbono SAE1020.

En esta etapa se vieron sometidos 2 procesos de fabricación fuertemente en la industria, para producir diferentes elementos.



Ilustración 52: Estructura base. Fuente: Fabricación propia.

4.1.1 Corte de piezas.

En este proceso es necesario dimensionar cada elemento antes de unir, para ello se utiliza un esmeril angular de tamaño 4.5', el cual está categorizado como una herramienta abrasiva. Las medidas de cada pieza corresponden al plano de estructura base adjunto en sección de anexos, específicamente en planos, estructura base.

4.1.2 Unión de piezas.

Una vez se encuentren las piezas dimensionadas para el armado estructural de la base, es necesario proceder a la unión de estos componentes por medio de algún proceso de ensamble, existiendo principalmente 2 tipos: apernado y soldadura.

El apernado de componentes corresponde a un tipo de unión estructural, el cual es utilizado para unir dos o mas componentes. Su aplicación no requiere maquinaria sofisticada, debido a que es un proceso simple y rápido, no obstante, requiere un diseño técnico con más detalle.

La soldadura es un proceso ampliamente utilizado a nivel mundial, es el proceso más común de realizar conexiones de acero estructural, consiste en unir dos o mas piezas mediante la fusión superficial de las caras involucradas, puede tener o no aporte de material, dependiendo del tipo de soldadura y el material a unir.

Por disponibilidad de maquinaria en taller, se selecciona el proceso ARCO MIG. Este proceso de soldadura al arco utiliza un alambre continuo y protección gaseosa.

Algunas de las ventajas de este proceso de fabricación corresponden a: pistola y cables de fácil manipulación, sistema versátil, rapidez de deposición, alto rendimiento.

4.2 Estanque hidroneumático y tapas.

El estanque utilizado para bombear el fluido a una determinada presión fue elaborado en el taller mecánico de la Universidad de Talca. La fabricación se basa según el diseño elaborado en el capítulo anterior, teniendo adjunto el dibujo técnico en el anexo asociado a Estanque hidroneumático. El material utilizado corresponde a un tubo de acero al carbono con medidas de 170 mm x 4 mm de espesor. La selección de este material se basa en su bajo costo y debido a que cumple con las pruebas mecánicas desarrolladas en el diseño mediante software.



Ilustración 53: Estanque hidroneumático. Fuente: Elaboración propia.

4.2.1 Torneado de cilindro para estanque.

El torneado se clasifica como un proceso de fabricación por arranque de viruta. Por medio de este proceso se pueden obtener piezas con tolerancias acotadas y buen acabado superficial. El torneado se utiliza para la fabricación de piezas por revolución, utilizando una herramienta llamada filo, la que avanza longitudinalmente mientras la pieza gira a una velocidad determinada. Existen diferentes tipos de torneados: Cilindrado, refrentado, torneado cónico, torneado de piezas perfiladas y tallado de roscas al torno.



Ilustración 54: Torno utilizado para fabricación de estanque hidroneumático. Fuente: Elaboración propia.

Para asegurar un buen corte de ambas caras del cilindro, es necesario someter al proceso de refrentado en ambas caras, para así asegurar la hermeticidad del estanque al momento de fabricar y soldar las tapas y así mantener presión constante en el proceso de deposición.



Ilustración 55: Cilindro refrentado en torno. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Corte con plasma de tapa superior.

Para la fabricación de la tapa superior se utiliza una placa de acero al carbono SAE1020 de 15 mm de espesor. Basado en el dibujo técnico es necesario cortar la placa de forma circular. En este caso es necesario utilizar una cortadora por plasma, la que tiene disponibilidad en el taller mecánico de la Universidad de Talca, campus Los Niches.

El fundamento del corte por plasma se basa en elevar la temperatura del material que se desea cortar de forma localizada. De forma básica el corte por plasma se basa en la acción térmica y mecánica de un flujo de gas, el que es calentado por un arco eléctrico.



Ilustración 56: Tapa superior de estanque cortada por plasma. Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Torneado para superior.

Una vez teniendo la pieza de la tapa cortada por plasma, es necesario suavizar los bordes y dar la forma del diseño propuesto. Primero es necesario perforar el centro de la pieza, para poder tener agarre en el plato del torno. Una vez teniendo la pieza posicionada en el torno es necesario hacer un desgaste lateral para suavizar y dar la medida final del diámetro de la pieza. El último paso es producir el desgaste para que la tapa pueda calzar perfectamente dentro del cilindro, esto mediante torneado y refrentado de la pieza.



Ilustración 57: Tapa superior estanque hidroneumático. Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 Piping para conexión de estanque hidroneumático.

En la tapa superior del estanque se genera el punto de conexión para la entrada de aire comprimido y salida de fluido presurizado, incluyendo además la instalación de un manómetro. Según diseño, es necesario instalar 3 conexiones roscadas internamente de $\frac{1}{4}$ pulgada, fabricada en acero inoxidable.

Primero es necesario perforar la tapa con taladro de pedestal y broca correspondiente al agujero pasante a realizar. Luego por disponibilidad de soldadura en taller se procede a soldar las coplas a la tapa superior, utilizando soldadura MIG. La precaución a considerar en esta etapa es la generación de poros en la unión y sus consecuencias en la hermeticidad del estanque. Este proceso debe verificarse sometiendo al estanque a presiones normales de operación, aplicando algún fluido espumoso en cada soldadura, verificando así la hermeticidad de la pieza.



Ilustración 58: Montaje piping en tapa superior. Fuente: Elaboración propia.

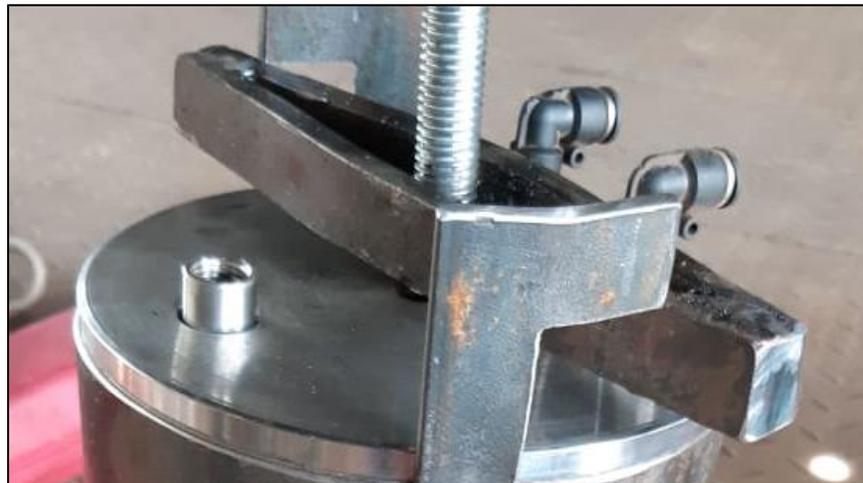


Ilustración 59: Ilustración 60: Montaje piping en tapa superior. Fuente: Elaboración propia.

4.2.5 Cerradura de tapa superior estanque hidroneumático.

El último procedimiento para finalizar la elaboración del estanque hidroneumático corresponde en la fabricación de un sistema de fácil cierre y apertura, así poder hacer la operación en el proceso de recubrimiento más práctico. Para esto se elaboró un hilo tornillo, que ejerce fuerza perpendicularmente en la tapa, teniendo como apoyo un par de orejas laterales fijadas en la estructura del estanque.



Ilustración 60: Sistema de cerradura de estanque hidroneumático. Fuente: Elaboración propia.

5 Instrumentación y control.

En este capítulo será posible observar la planta mediante la lógica de control del proceso, mencionando los instrumentos, drivers y controlador utilizado.

5.1 Diagrama de instrumentación y proceso.

El diagrama de instrumentos y procesos, también denominado P&ID por sus siglas en inglés (Piping and Instruments Drawings), se utiliza para la interconexión en equipos industriales los cuales utilizan instrumentos de medidas y actuadores, con la finalidad de automatizar un proceso. La normativa utilizada para establecer la información mínima necesaria de estos diagramas más utilizada corresponde a la norma ISA-S5.1 2009 [21].

La siguiente ilustración muestra el diagrama P&ID de la planta de recubrimientos diseñada en capítulos anteriores.

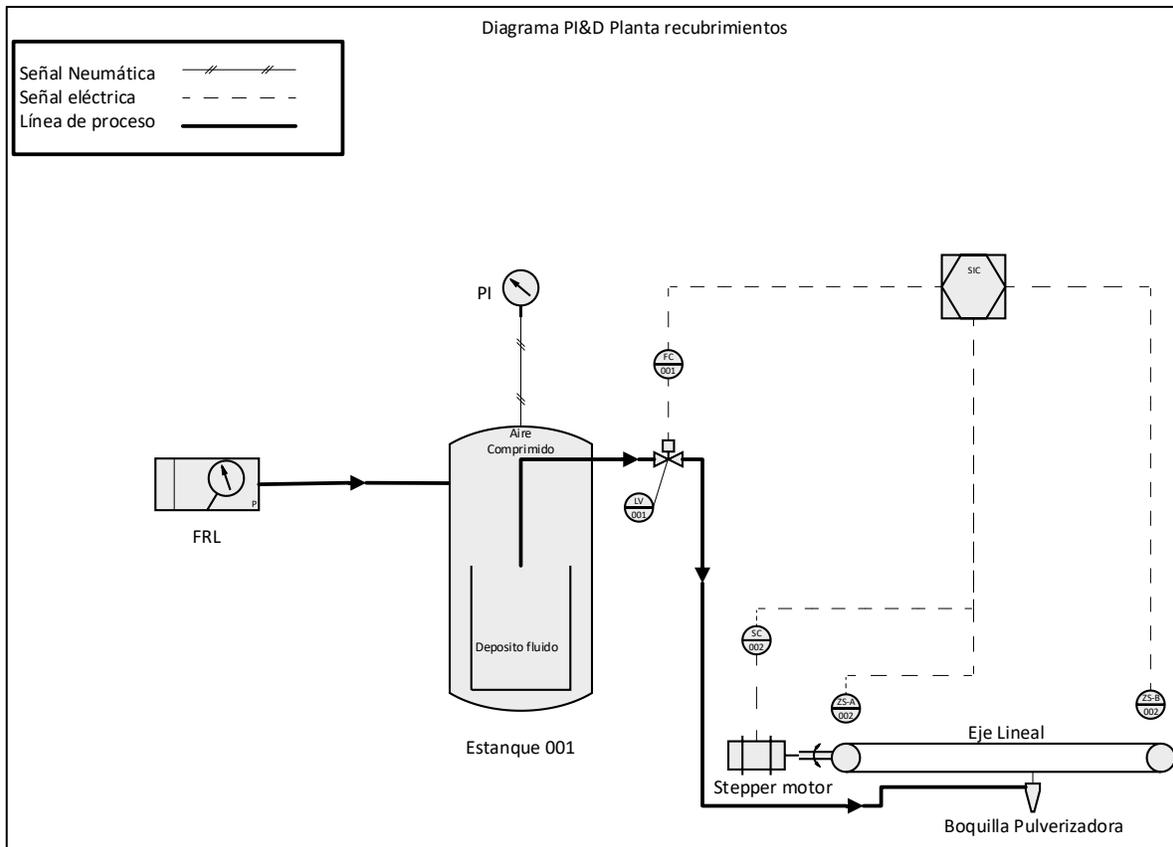


Ilustración 61: Diagrama PI&D de planta de recubrimientos. Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama anterior es posible identificar los lazos de control que llevarán a cabo el proceso deseado por la planta. Existe un lazo que controla el flujo del compuesto utilizado para el recubrimiento, mientras que el segundo lazo controla la velocidad del motor para otorgar un espesor determinado por el set point.

Tabla 20: Componentes de diagrama P&ID. Fuente: Elaboración propia.

LAZO DE CONTROL	NOMENCLATURA	INSTRUMENTO	COMPONENTE
Global	SIC	Controlador indicador de velocidad	Arduino UNO
001	FC	Control de flujo	Arduino UNO
001	LV	Actuador de válvula	Relé
002	ZS-A	Sensor de posición de boquilla A	Sensor fin de carrera
002	ZS-B	Sensor de posición de boquilla B	Sensor fin de carrera
002	SC	Actuador de velocidad de motor	Relé

5.2 Diagrama sistema total.

En base al diagrama visto en el ítem anterior, de la interconexión de diferentes componentes es necesario tener el diagrama de conexionado eléctrico de la planta. Por lo cual en la Tabla 21 está el listado completo de cada componente.

Tabla 21: Componentes del sistema total. Fuente: Elaboración propia.

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN
Arduino UNO	Microcontrolador empleado en el sistema (ver 9.2.1)
TB6600	Driver motor paso a paso 3.5 A (ver 9.2.3)
Motor bistepper	Motor nema 17 4.5V, 1.5 A, 67N-cm, 1.8° (ver 9.2.2)
SW1-SW2	Final de carrera vertical con PCB
Q1	Driver mosfet IRF520 (ver 9.2.4)
Solenoid	Electroválvula solenoide 12V ½ NC (ver 9.2.5)

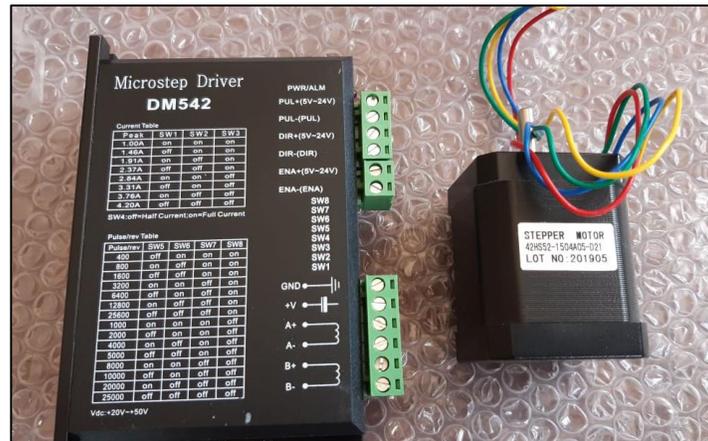


Ilustración 62: Driver TB6600 y motor paso a paso Nema 17

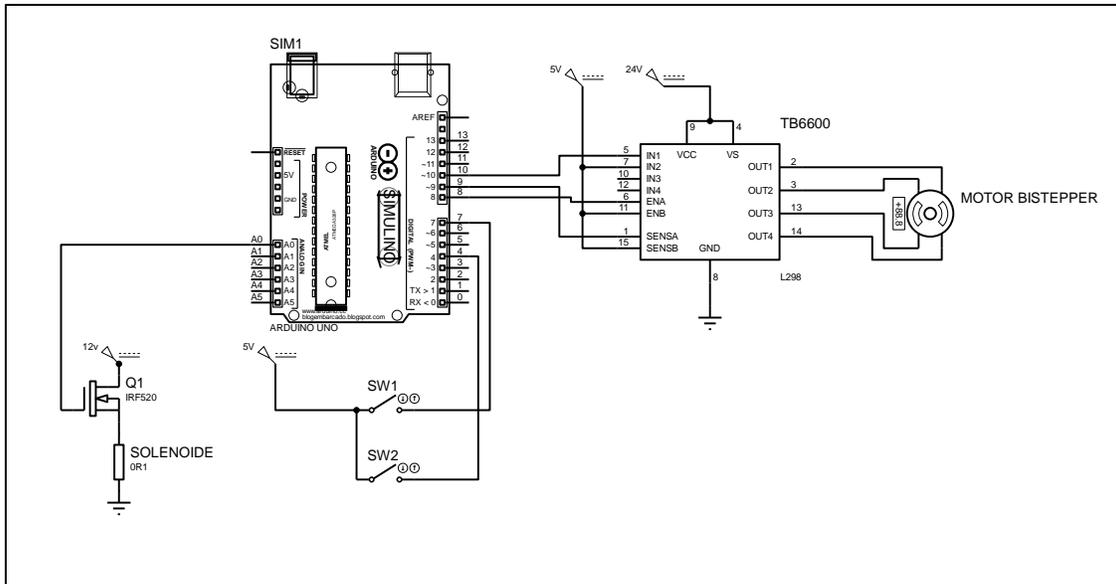


Ilustración 63: Diagrama de conexión. Fuente: Elaboración propia.

Todos los componentes electrónicos se encuentran dentro de una caja estanco, utilizada en la industria para proteger componentes electrónicos de humedad y polvo en el ambiente.



Ilustración 64: Caja estanco, componentes electrónicos y parada de emergencia. Fuente: Elaboración propia.

5.3 Estrategia de control.

El control automático de procesos se ha convertido en una parte esencial en diferentes sistemas, como por ejemplo, procesos modernos de fabricación, naves espaciales, vehículos y así en muchos procesos industriales que requieran controlar algún parámetro, para así optimizar los procesos y en lo ideal disminuir costos operativos.

La planta diseñada anteriormente requiere de un sistema de control que sea capaz de otorgar que el proceso se lleve a cabo satisfactoriamente. La entrada del sistema de la planta corresponde a la variable “espesor del recubrimiento”. Esta variable debe ejercer un control sobre las RPM del motor, las que afectarán directamente a la velocidad lineal del pulverizador y el tiempo de pulverizado. Debido a que el control opera en base de tiempo, lo óptimo es utilizar un control de lazo abierto. Si bien este método posee algunas desventajas como, que las perturbaciones no son detectadas y el resultado final no es comparado con la entrada del sistema. Pero esto se debe suplir realizando una calibración metódica del sistema.

La relación que existe entre el espesor del recubrimiento y la velocidad del motor en RPM corresponde a la siguiente igualdad:

$$RPM = \frac{V_l * 60}{d_{polea} * \pi}$$

Con:

V_l : Velocidad lineal del pulverizador en m/s.

d_{polea} : Diámetro de la polea en metros.

La velocidad lineal del pulverizador está en función de la distancia que debe recorrer el pulverizador y el tiempo que demora en hacerlo.

$$V_l = \frac{L}{t}$$

Con:

L : recorrido del pulverizador en metros.

t : tiempo necesario para lograr el espesor b en segundos.

Reemplazando V_l en la expresión de RPM :

$$RPM = \frac{\frac{L}{t} * 60}{d_{polea} * \pi}$$

El tiempo t depende del volumen que se desea aplicar en el recubrimiento para lograr un espesor b y del caudal de la boquilla.

$$t = \frac{Vol_{(lts)} * 60}{Q}$$

$Vol_{(lts)}$: Corresponde al volumen necesario para realizar el recubrimiento expresado en litros.

Q : Caudal de la boquilla en lts/min.

$$RPM = \frac{60 * L * Q}{d_{polea} * \pi * Vol_{(lts)} * 60}$$

$$Vol_{(lts)} = \frac{Vol_{(mm^3)}}{10^6} = \frac{A * L * b}{10^6}$$

$Vol_{(mm^3)}$: Volumen del recubrimiento en mm³.

A : Ancho del recubrimiento en mm.

b : Espesor del recubrimiento en mm.

Finalmente, la expresión de RPM en función del espesor queda:

$$RPM = \frac{10^6 * Q}{d_{polea} * \pi * A * b}$$

Encontrada la relación de la variable a controlar (RPM), con la variable de salida del sistema, el usuario solo debe ingresar un set point correspondiente al valor del espesor que desea aplicar en el recubrimiento.

5.4 Lógica de control.

La lógica de control de la planta proporciona una ayuda para entender mejor el proceso que se debe realizar y es una guía para poder desarrollar códigos de programación de la planta, utilizando la toma de decisiones en diferentes casos que se deben evaluar para desarrollar una acción, dependiente del instrumento que esté mandando alguna señal. En este ítem se mostrará un diagrama de bloques con el funcionamiento.

Debido a que el proceso será repetitivo, es necesario en la operación tener conectado el controlador a una interfaz gráfica, en la cual el operador podrá seleccionar el espesor que se quiera aplicar al material por recubrir.

Teniendo conectado el microcontrolador con la interfaz gráfica el primer paso corresponde encender el sistema con el interruptor general de la planta. Automáticamente el controlador realizará un recorrido hasta alcanzar los dos sensores finales de carrera en cada extremo del recorrido, este proceso se denomina “*homming*” y se utiliza principalmente para, verificar que se realice el recorrido de la boquilla y posicionar la boquilla siempre en el punto inicial.

Una vez ubicada la boquilla en la posición inicial, se darán 3 alternativas de operación. La primera alternativa será realizar “*homming*” en el sistema. La segunda opción será ingresar el espesor deseado por pasada de la boquilla por sobre el material a recubrir, y al mismo tiempo elegir la cantidad de pasadas, lo que en la sumatoria otorgaría un valor final de espesor. La última opción corresponde a “*lavado del sistema*”. Este proceso debe llevarse a cabo una vez finalizado el recubrimiento, donde la boquilla se posicionará en el otro extremo por un determinado tiempo, expulsando por la boquilla algún solvente capaz de limpiar ductos, electroválvula y boquilla. En la interfaz estará la opción de desconectar el sistema de la comunicación para poder cerrar la operación.

El sistema cuenta con un botón de emergencia en caso de requerir cancelar repentinamente el proceso.

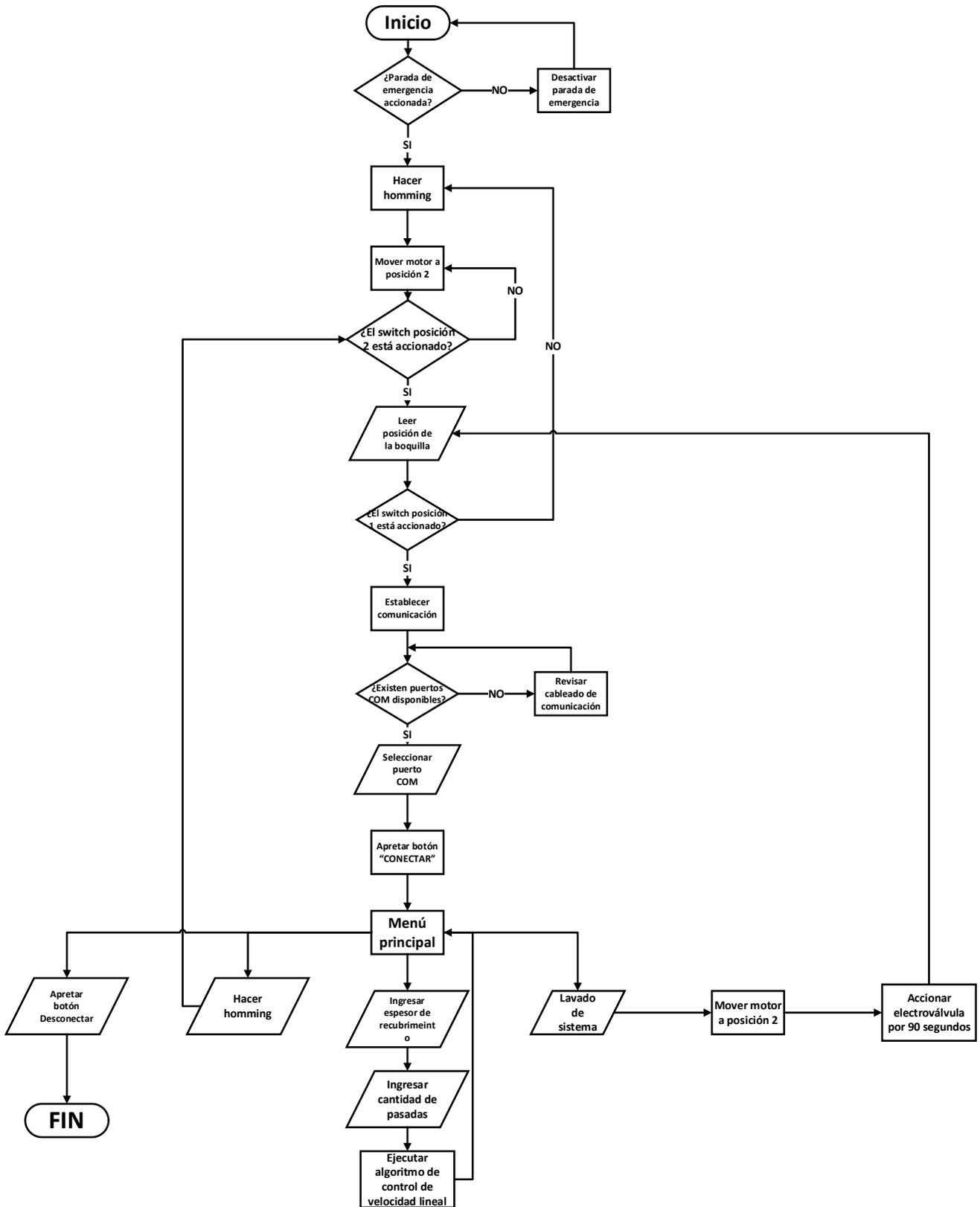


Ilustración 65: Diagrama de bloques planta de recubrimientos. Fuente: Elaboración propia.

Para llevar a cabo la lógica de control propuesta de manera conceptual y esquemática, es necesario realizar dos códigos. El primero corresponde al que gobernará al microcontrolador (Arduino) y el segundo el que generará la comunicación mediante Puerto Serial entre el Arduino y la pantalla, display o en este caso, la aplicación de escritorio diseñada para Windows.

5.5 Programación microcontrolador Arduino.

Basado en el diseño propuesto, los requerimientos propuestos y la lógica de control mencionada anteriormente, es posible desarrollar los códigos de programación necesarios para ejecutar un óptimo funcionamiento de la planta. Debido a la utilización de motor paso a paso combinado con un driver digital de micropasos TB6600, la programación y control de velocidad se desarrolla mediante la librería "*AccelStepper.h*". La utilización de esta librería simplifica el manejo de motores paso a paso, otorgando velocidades estables y aceleraciones ajustables según el diseño previo.

La posición del carro porta boquilla se realiza mediante los pasos del motor, cuyo ángulo de paso es 1.8° . Es necesario determinar la cantidad de pasos necesarios para establecer la distancia a recorrer con el pulverizador.

5.6 Interfaz usuario-máquina.

La interfaz fue creada mediante el software Visual Studio 2019 ®. Como se mencionó en el capítulo anterior, lo primero que se debe verificar es la disponibilidad de puertos COM disponibles, de existir, se debe seleccionar el correspondiente al utilizado por el microcontrolador. Además de los botones de operación, el microcontrolador genera textos de aviso del estado del proceso, los que se pueden ver reflejados por un cuadro de dialogo existente.

El microcontrolador podrá tener conexión con el ordenador mediante comunicación puerto serial, la que se encarga de enviar y recibir datos de manera secuencial utilizando dos señales: TX correspondiente a transmisión de datos y RX correspondiente a la recepción de datos.



Ilustración 66: Interfaz gráfica. Fuente: Elaboración propia.

6 Puesta en marcha y pruebas experimentales.

La puesta en marcha de la planta fabricada se desarrolló sin la opción de realizar pruebas experimentales de recubrimiento. No obstante, las pruebas realizadas de funcionamiento se basaron en medir velocidades angulares del motor, cuya relación es directa con el tiempo del desarrollo de la película delgada, además de inspeccionar el correcto bombeo del fluido con el estanque hidroneumático diseñado.

Se realizaron pruebas de movimiento del sistema completo, cumpliendo las expectativas del diseño y requerimientos del proceso, realizando movimientos suaves y sin vibraciones. Se observan aceleraciones y desaceleraciones óptimas, para evitar el aumento excesivo del torque del motor, llegando de manera precisa a los dos extremos. Por lo cual la unión del sistema mecánico con la electrónica y programación desarrollada cumplen óptimamente pruebas de movimientos.

Las pruebas hidroneumáticas se llevaron a cabo con presiones de operación del rango de 3-5 Bar utilizando agua como líquido asperjado. Es preciso señalar que a presiones inferiores a la mencionada, la boquilla pierde la forma del chorro desarrollado produciendo un efecto no deseado en la aplicación. Por lo cual es óptimo contar con red de aire comprimido adecuado para su operación. El exceso de presión del caudal del fluido puede provocar un deterioro temprano en los componentes de la boquilla según lo señalado por el fabricante.



Ilustración 67: Puesta en marcha del sistema. Fuente: Elaboración propia.

Las velocidades máximas obtenidas con la combinación del sistema mecánico, programación y drivers utilizados corresponden a 1200 RPM en el eje del motor. Esto puede llevar a desarrollar espesores en el recubrimiento hasta de 10 μm como límite inferior. Las velocidades mínimas probadas en el sistema fueron de 20 RPM lo que puede llegar a desarrollar capas delgadas hasta de 500 μm por pasada. Al reducir las velocidades el motor comienza a presentar un aumento significativo en sus bobinas, lo que probablemente puede llevar a un deterioro temprano del componente. Los espesores fueron determinados teóricamente por distintos parámetros del diseño (ancho del recubrimiento, recorrido de boquilla, tiempo de exposición, tipo y características técnicas de la boquilla seleccionada, altura entre el sustrato y la boquilla)

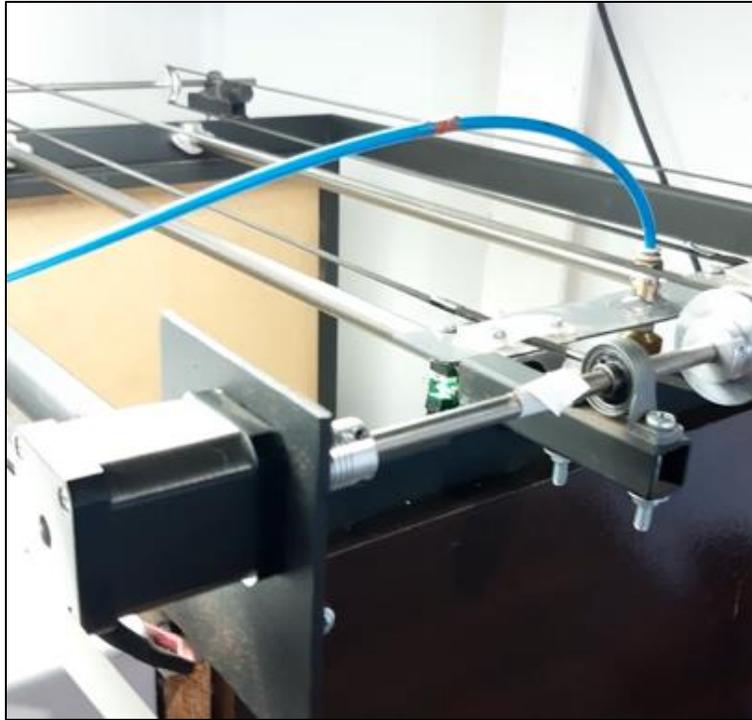


Ilustración 68: Puesta en marcha del sistema. Fuente: Elaboración propia.

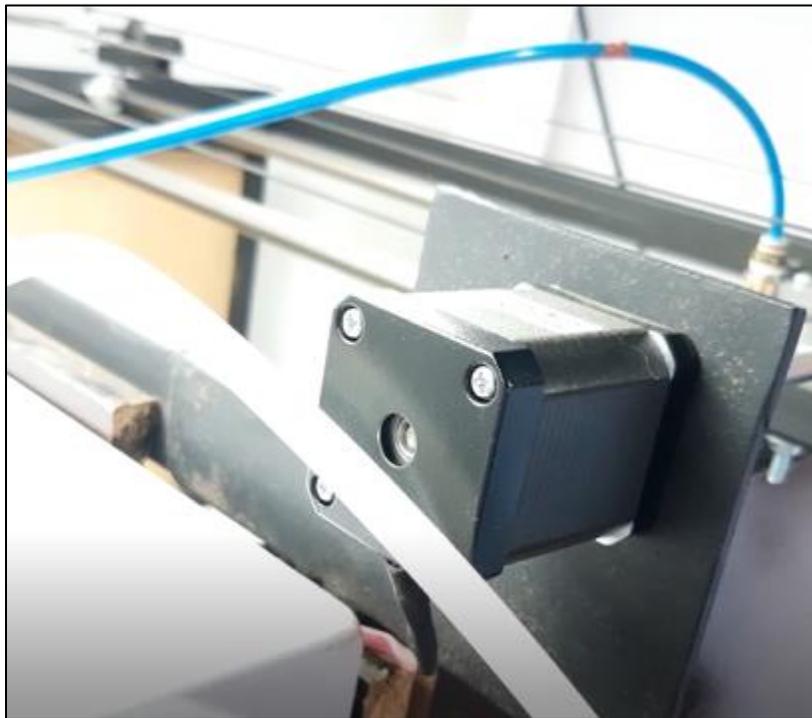


Ilustración 69: Motor nema 17 montado en planta. Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 70: Montaje de sistema de transmisión montado en planta. Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 71: Estanque hidroneumático montado en planta. Fuente: Elaboración propia.

7 Conclusiones.

En este trabajo se diseñó e implementó un prototipo de un sistema automatizado para realizar recubrimientos superficiales sobre paneles fotovoltaicos. La propuesta nace desde la necesidad de aplicar mejoras en plantas solares fotovoltaicas en Chile, específicamente relacionadas al manejo de la limpieza del cristal superior de los paneles.

Como se menciona en el estado del arte, la suciedad de los paneles es un tema que influye negativamente sobre la eficiencia de estos dispositivos, incluso afectando la vida útil de éstos. Cabe señalar que el estudio desarrollado no implica variables externas, como por ejemplo, temperatura de aplicación, desarrollo de fluidos utilizados en el proceso (cerámicos u otros).

El estudio implica la fabricación y puesta en marcha de la planta diseñada, la que integra distintos sistemas, principalmente 3, mecánico, electrónico e hidráulico. Se desarrolló el cálculo en base a los requerimientos mínimos de operación de la planta.

La etapa de construcción es un proceso muy importante en el desarrollo del proyecto, se debe realizar el manejo de diferentes procesos de fabricación para poder ensamblar cada componente de manera óptima y sin dañar ningún ensamble ni materiales. Existen componentes que su adquisición puede demorar mas de lo previsto y una mala manipulación puede retrasar todo el proceso de ensamble. Otro punto importante es la disponibilidad de herramientas y taller para la fabricación de piezas específicas, como el estanque en este caso, la elección del proceso de fabricación es vital para tener buenos resultados. Por este motivo se concluye que este proceso debe realizarse bajo condiciones de trabajo óptimas, utilizando las herramientas necesarias para cada ensamble y poder cumplir con los plazos establecidos de entrega programados en la carta Gantt.

El desarrollo de la interfaz gráfica y programación es un trabajo metódico y siempre de aprendizaje, cada software de programación y diseño gráfico posee diferentes lenguajes, por lo cual requiere un proceso de adaptación y aprendizaje para poder lograr el objetivo deseado. En este caso particular, lograr el funcionamiento de la lógica planteada y además la comunicación con una interfaz que sea amigable y de fácil manipulación para el operador. Se concluye que el desarrollo de algoritmos de funcionamiento siempre debe considerar futuras mejoras en la programación, de esta manera el desarrollo computacional en las distintas maquinas está en constante desarrollo, provocando grandes cambios operacionales agregando o quitando líneas de código en el algoritmo de funcionamiento. En este caso pensando en las diferentes aplicaciones que pueden ser desarrolladas utilizando la máquina diseñada y construida. Por ejemplo aplicaciones de sanitización automatizada, aplicaciones agrícolas y control de plagas, etc.

En conclusión general, la planta cumple con las expectativas planteadas. Sin embargo, para poder finalizar de manera óptima el trabajo, es necesario poder realizar pruebas reales de recubrimientos y poder medir los distintos espesores de capa, con eso basta para poder realizar una calibración más precisa de la planta, en este caso no fue

posible realizar dichas pruebas por motivos de fuerza mayor, la falta de TiO₂ (recubrimiento más utilizado para otorgar grados de auto limpieza en vidrios) fluido cuyas propiedades fueron utilizadas para el diseño hidráulico. El otro motivo es la falta de instrumento para poder medir el espesor de las capas aplicadas, para así tener un feedback real del setpoint utilizado en la máquina y mejorar su calibración.

7.1 Mejoras y trabajos futuros.

- El sistema no contempla un control de temperatura dentro de la cámara, parámetro importante para poder lograr recubrimientos más finos y con mejor acabado superficial. Sería de gran utilidad agregar al sistema dicho control.
- El sistema no cuenta con un estudio de aislación térmica en las paredes de la cámara, por lo cual si se desarrolla una estrategia de control relacionada al manejo de temperaturas internas de la cámara esto sería necesario de implementar.
- Se propone desarrollar diferentes técnicas de control del proceso, debido a la falta de instrumento que mida espesor instantáneo de las capas depositadas, para así realizar un control de lazo cerrado, lo que provocaría mayor precisión en la técnica aplicada. Se propone sistema de laser insitu para el control.
- Se propone investigar diferentes tipos de deposición de películas delgadas, utilizando la misma estructura construida, como por ejemplo utilizar boquillas asistidas por aire, que poseen tamaños de gota más pequeños que las boquillas hidráulicas (utilizada en este estudio).
- Se propone buscar y aplicar la lógica del recubrimiento diseñado en esta planta, para otros procesos, por ejemplo, la desinfección de superficies o elementos, aplicar mejoras de carácter térmicas en vidrios o paredes.

8 Bibliografía.

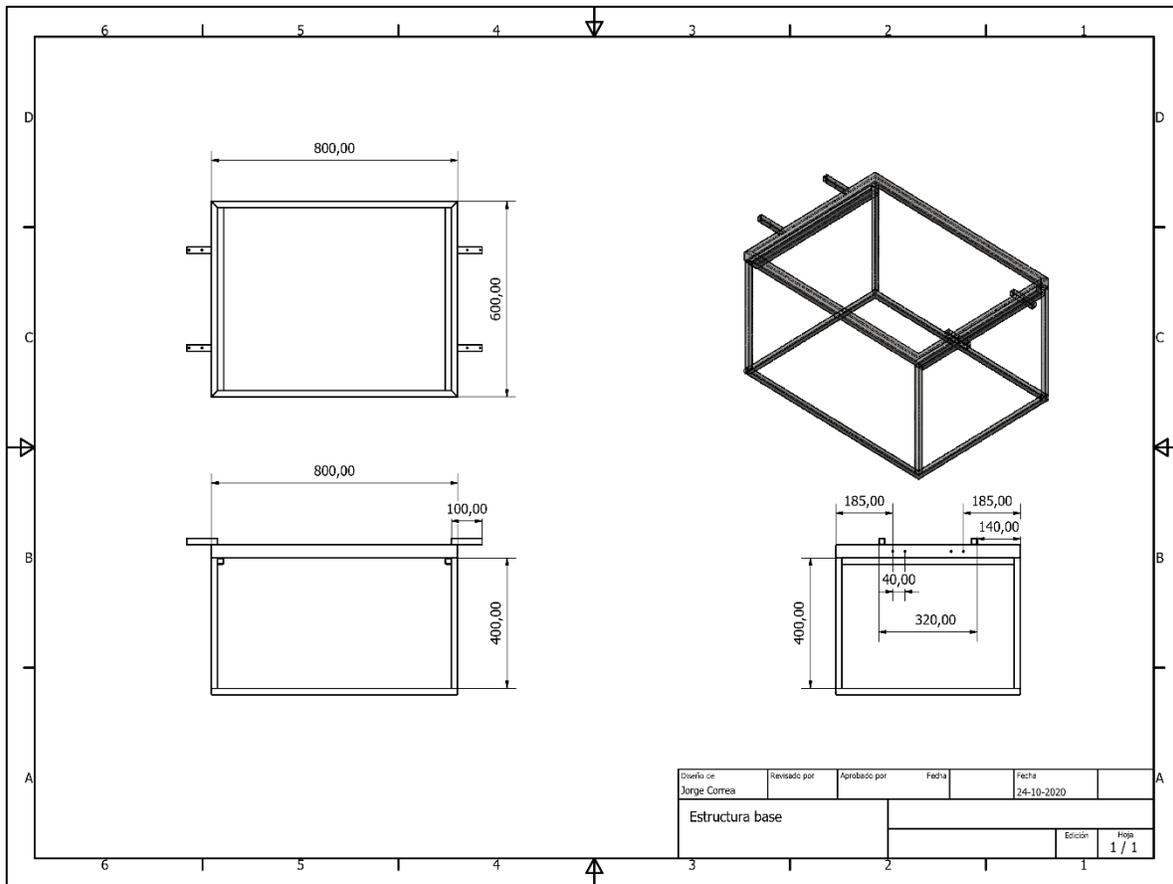
- [1] P. N. Duque, «Análisis de factores que influyen en la suciedad de paneles fotovoltaicos y su efecto sobre la producción de energía eléctrica,» Departamento de Ingeniería Energética, Sevilla, 2016.
- [2] B. J. B. D. A. M. Badi H, «Dust Event Impact on Photovoltaic Systems : Role of humidity in soiling and self-cleaning,» de *IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, 2018.
- [3] División de Infraestructura Energética, «Proyectos en Construcción e Inversión en sector Energía a Enero 2019,» 2019. [En línea]. Available: www.energia.gob.cl/sites/default/files/despensa_enero_2019.pdf.
- [4] M. Rivera, «An overview of solar energy in Chile,» *configurations of power converters for grid interconnection*, n° 4, 2016.
- [5] D. M. J. W. S. K. J. M. Q. S. G. K. S. M. I. T. D. A. M. S. L. S. a. C. V. M.D. Kempe, Field testing of thermoplastic encapsulants in high-temperature installations, 2015.
- [6] F. M. Alejandra Molina Monje, «Modelo de generación fotovoltaica,» Ministerio de energía, 2017.
- [7] A. S. Juan Cepeda, «Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones,» Bogotá.
- [8] «<https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>,» [En línea].
- [9] J. V. G. S. O. C. S. O. D. Almarza, «Guía de operación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos,» Ministerio federal de medio ambiente, protección de la naturaleza, obras públicas y seguridad nuclear., Santiago, 2016.
- [10] J. B. M. W. P.A. Patil, «A Review on Cleaning Mechanism of Solar Photovoltaic Panel,» Shivaji University, Kolhapur, 2017.
- [11] «<http://www.nomaddesertsolar.com/>,» [En línea].
- [12] P. M. Martin, Handbook of deposition technologies for films and coatings - science, applications and technology, 2005.
- [13] F. Orgaz, «Recubrimientos. Una tecnología en desarrollo en el campo del vidrio,» Madrid.
- [14] Y.-Y. S. Shing-Dar, «Superhydrophobic antireflective coating with high transmittance,» Institute of Materials Science, National Yunlin University , Taiwan, 2013.
- [15] K. I. F. L. G. W. J. M. W. C. S. T. Brennen M. Freiburger1, «Durable High-performance Water-based Anti-Reflective Coating for PV Module Glass,» Fayetteville, Leicestershire, 2018.
- [16] A. F. M. C. A. B. S. C. E. A. C. L. S. ., L. P. ., M. B. L. Ciani, «Self-cleaning of Si photovoltaic modules by a nanostructured TiO2 spray-coating,» University of Florence, Florence, 2017.
- [17] W. J. M. C. E. W. Aaron D. Deuschman, «Diseño de maquinas - Teoria y Practica,»

- Mexico, Compañía editorial continental, S. A, 1987.
- [18] P. Childs, «Mechanical Design,» 2004.
- [19] W. S. D. o. Health, «Sistemas de control de tanque hidroneumaticos,» 2011.
- [20] Evonik industries, «AEROXIDE®, AERODISP® and AEROPERL® Technical Information 1243,» 2015.
- [21] Spraying System Co, «Catalogo 70M-spanish».
- [22] Cimech 3D, «Transmisión de movimiento,» [En línea]. Available: <https://www.cimech3d.cl/categoria-producto/transmision-de-movimiento/>.
- [23] ISA, «American national standard ansi/isa-5.1-2009 instrumentation symbols,» 2009.
- [24] A. F. M. C. L. A. B. S. C. E. A. C. M. B. L. S. L.Ciani, «Self-cleaning of Si photovoltaic modules by a nanostructured TiO₂ spray-coating,» 2017.

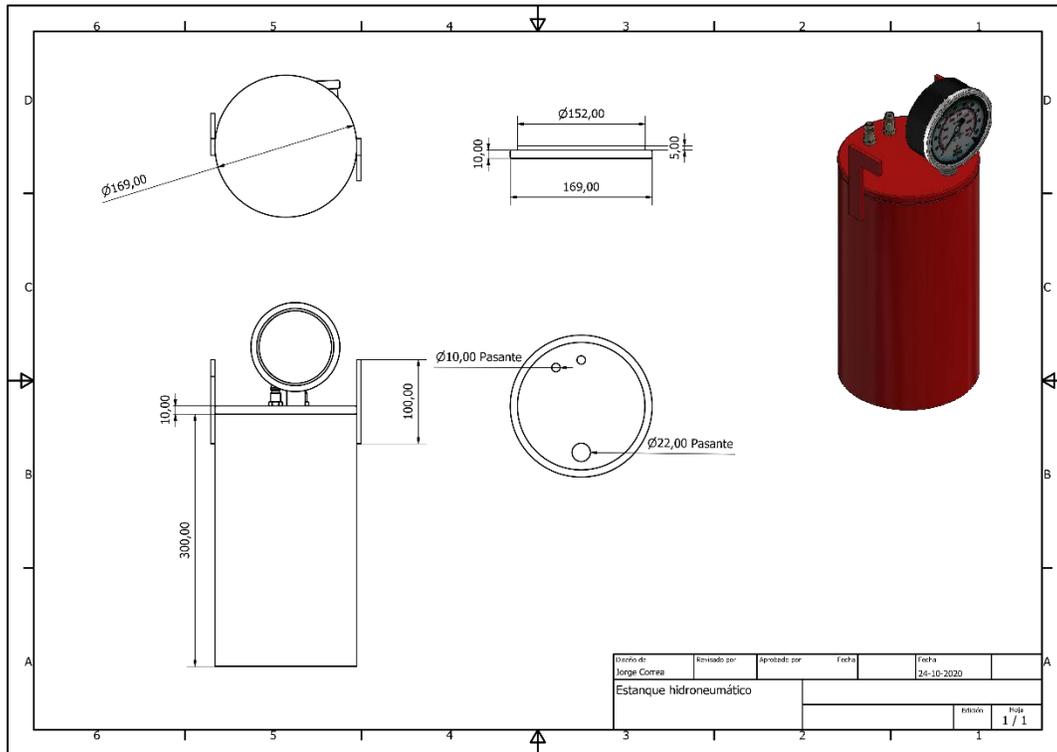
9 Anexos.

9.1 Planos.

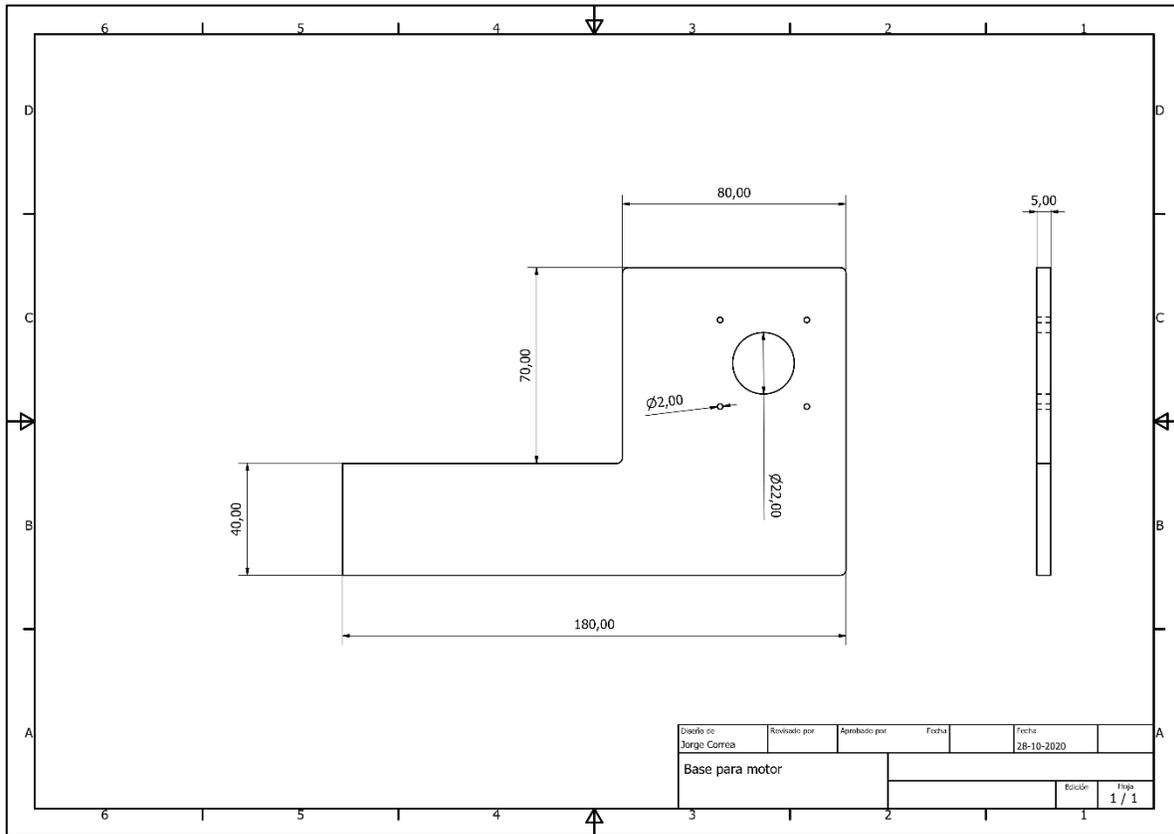
9.1.1 Estructura base.



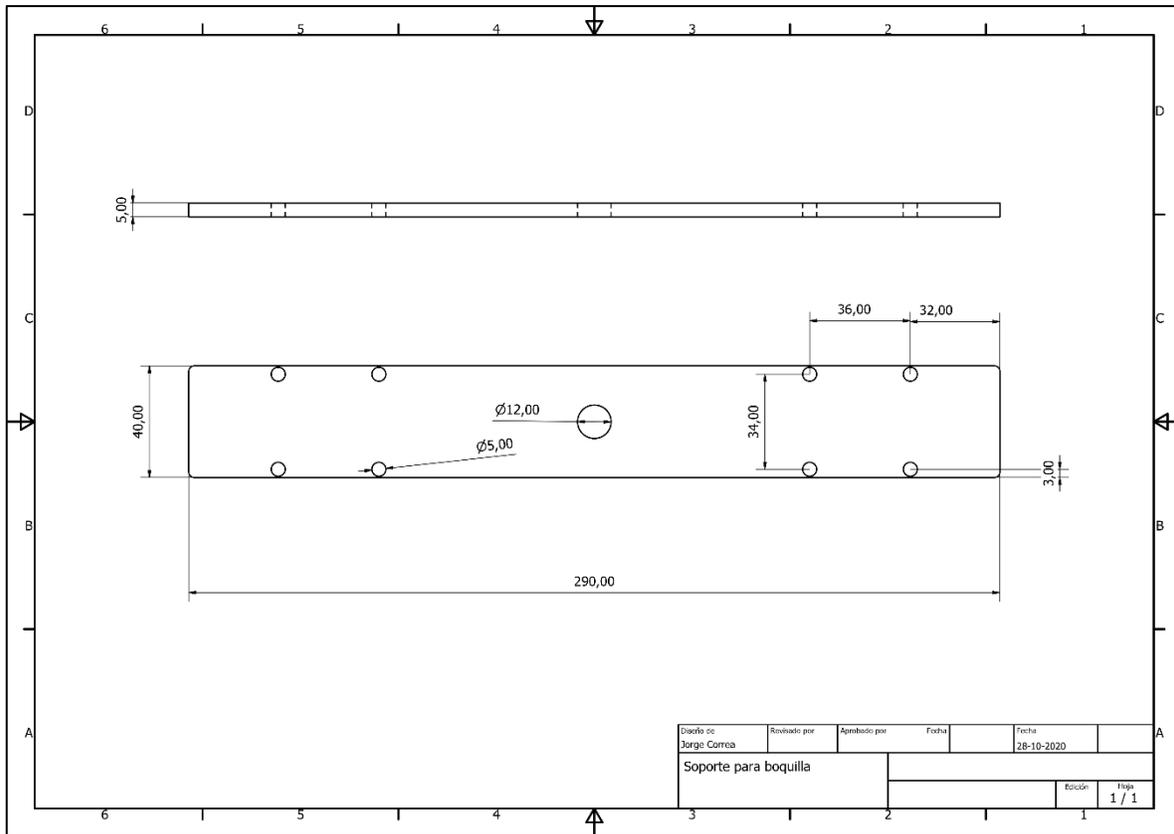
9.1.2 Estanque hidroneumático.



9.1.3 Base para motor.

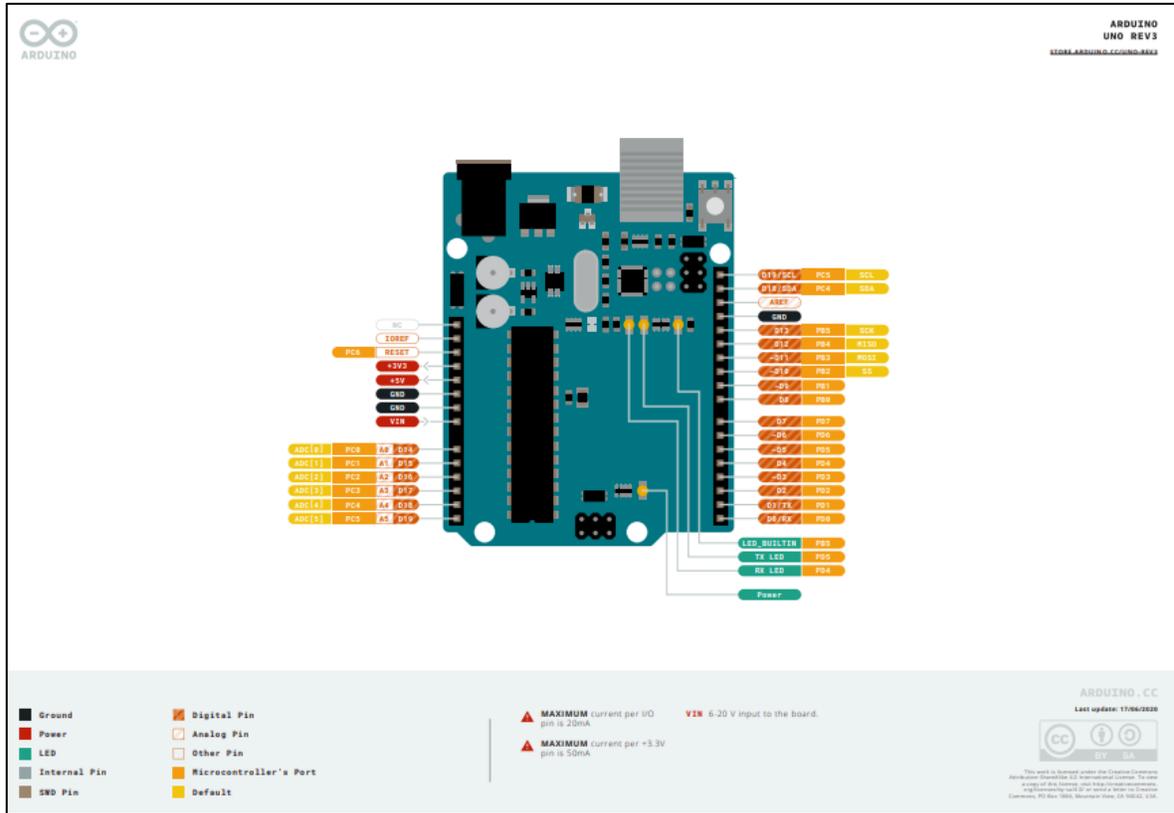


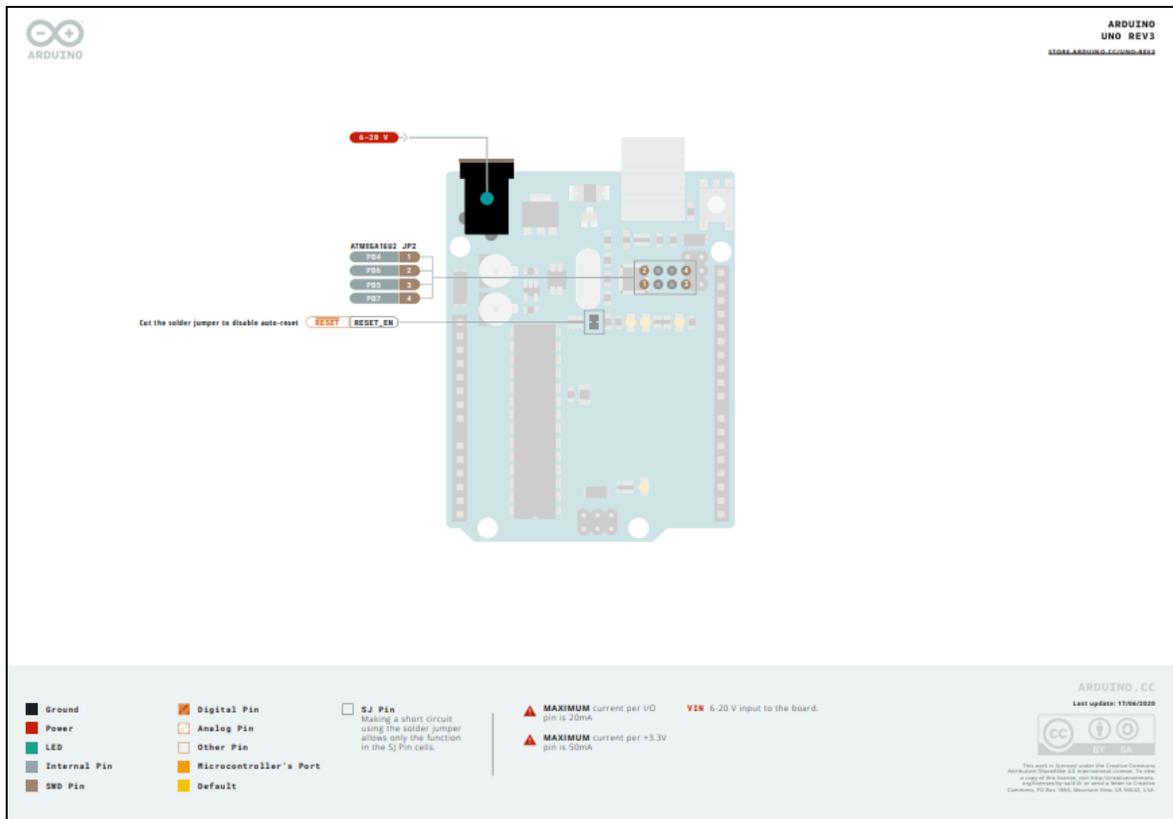
9.1.4 Soporte porta boquilla.



9.2 Data sheet.

9.2.1 Arduino uno.





9.2.2 Nema 17.

MOONS

MS17HD Series: 1.8° - Size 17

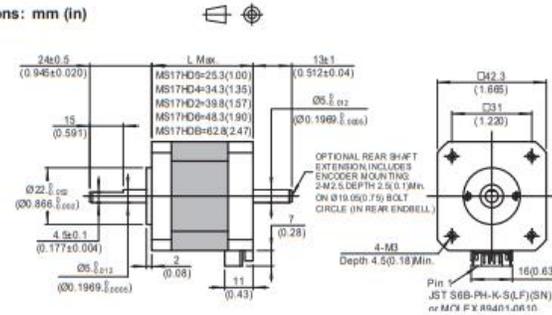


- Phases 2
- Steps / Revolution 200
- Step Accuracy ±5%
- Shaft Load (20,000 Hours at 1000 RPM)
 - Axial 25 N (5.6 Lbs.) Push
 - Radial 65 N (15 Lbs.) Pull
 - 29 N (6.5 Lbs.) At Flat Center
- IP Rating 40
- Approvals UL Recognized File E465363, RoHS
- Operating Temp. -20°C to +50°C
- Insulation Class B, 130°C
- Insulation Resistance 100 MegOhms

MS17HD 4 P 4 040 -M

<p>Basic Motor Length (Max)</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr><td>5</td><td>25.3mm (1.0 in.)</td></tr> <tr><td>4</td><td>33.8mm (1.35 in.)</td></tr> <tr><td>2</td><td>39.8mm (1.57 in.) 1 Stack</td></tr> <tr><td>6</td><td>48.3mm (1.90 in.) 2 Stack</td></tr> <tr><td>B</td><td>62.8mm (2.47 in.) 3 Stack</td></tr> </table> <p>Electrical Connection</p> <p>P Plug-in Connector</p> <p>Number of Connections</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr><td>4</td><td>4 Lead-Bipolar</td></tr> <tr><td>6</td><td>6 Lead-Unipolar(Bipolar)</td></tr> </table>	5	25.3mm (1.0 in.)	4	33.8mm (1.35 in.)	2	39.8mm (1.57 in.) 1 Stack	6	48.3mm (1.90 in.) 2 Stack	B	62.8mm (2.47 in.) 3 Stack	4	4 Lead-Bipolar	6	6 Lead-Unipolar(Bipolar)	<p>Options</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr><td>Om</td><td>No Options</td></tr> <tr><td>-M</td><td>5mm Diameter Rear Shaft With Encoder Mounting Holes</td></tr> </table> <p>Winding</p> <p>### Current rating x 100</p>	Om	No Options	-M	5mm Diameter Rear Shaft With Encoder Mounting Holes
5	25.3mm (1.0 in.)																		
4	33.8mm (1.35 in.)																		
2	39.8mm (1.57 in.) 1 Stack																		
6	48.3mm (1.90 in.) 2 Stack																		
B	62.8mm (2.47 in.) 3 Stack																		
4	4 Lead-Bipolar																		
6	6 Lead-Unipolar(Bipolar)																		
Om	No Options																		
-M	5mm Diameter Rear Shaft With Encoder Mounting Holes																		

Dimensions: mm (in)



Technical drawing showing dimensions in mm (in) for the MS17HD motor. Key dimensions include: total length 24±0.5 (0.946±0.020), shaft diameter Ø5.0±0.012 (0.1969±0.0005), and various mounting hole positions. A note specifies: 'OPTIONAL REAR SHAFT EXTENSION INCLUDES ENCODER MOUNTING: 2-M2.5 DEPTH 2.5(0.1W) ON Ø19.05(0.75) BOLT CIRCLE (IN REAR END BELL)'. The drawing also shows a 4-M3 mounting hole with a depth of 4.5(0.18) Min and a pin for JST S6B-PH-K-S(LF)(SN) or M7.5 Fx Aban 1.0610.

33

www.moonsindustries.eu



MS17HD - 4 Lead Bi-Polar

Length	Model Number	Connect	Rated Current	Holding Torque		Winding Ohms		Detent Torque	Rotor Inertia		Motor Weight	
				Amps (mounted)	Nm Typ. oz-in TYP.	±10% @20°C	Typ.		mNm oz-in	g cm ² oz-in ²	kg Lbs	
25.3 mm (1 in.)	MS17HD6P4027	P	0.27	0.20	28	44	53	5	0.71	20	0.11	0.5 0.33
	MS17HD6P4070	P	0.7	0.21	30	6.5	8.8					
	MS17HD6P4100	P	1	0.21	30	3.2	4.3					
	MS17HD6P4150	P	1.5	0.20	28	1.31	1.66					
34.3 mm (1.35 in.)	MS17HD4P4040	P	0.4	0.34	48	30	51	12	1.7	38	0.21	0.21 0.46
	MS17HD4P4065	P	0.65	0.32	45	8.7	15.4					
	MS17HD4P4100	P	1	0.33	47	4.2	7.5					
	MS17HD4P4150	P	1.5	0.32	45	1.7	2.9					
39.8 mm (1.57 in.) 1 Stack	MS17HD2P4040	P	0.4	0.48	68	24	56	15	2.1	57	0.31	0.28 0.62
	MS17HD2P4100	P	1	0.48	68	3.9	8.9					
	MS17HD2P4150	P	1.5	0.50	71	1.98	4.3					
	MS17HD2P4200	P	2	0.48	68	1.04	2.2					
48.3 mm (1.9 in.) 2 Stack	MS17HD6P4050	P	0.5	0.67	95	24	53	25	3.5	82	0.45	0.36 0.79
	MS17HD6P4100	P	1	0.63	89	4.9	11.5					
	MS17HD6P4150	P	1.5	0.62	88	2.2	4.9					
	MS17HD6P4200	P	2	0.63	89	1.3	2.9					
62.8 mm (2.47 in.) 3 Stack	MS17HDBP4100	P	1	0.62	120	5.6	14.6	30	4.2	123	0.67	0.5 1.3
	MS17HDBP4150	P	1.5	0.88	120	3	7.7					
	MS17HDBP4200	P	2	0.63	120	1.49	3.8					

^ Preferred model

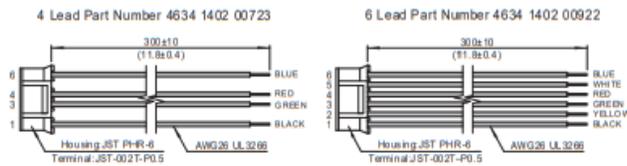
MS17HD - 6 Lead Uni-Polar

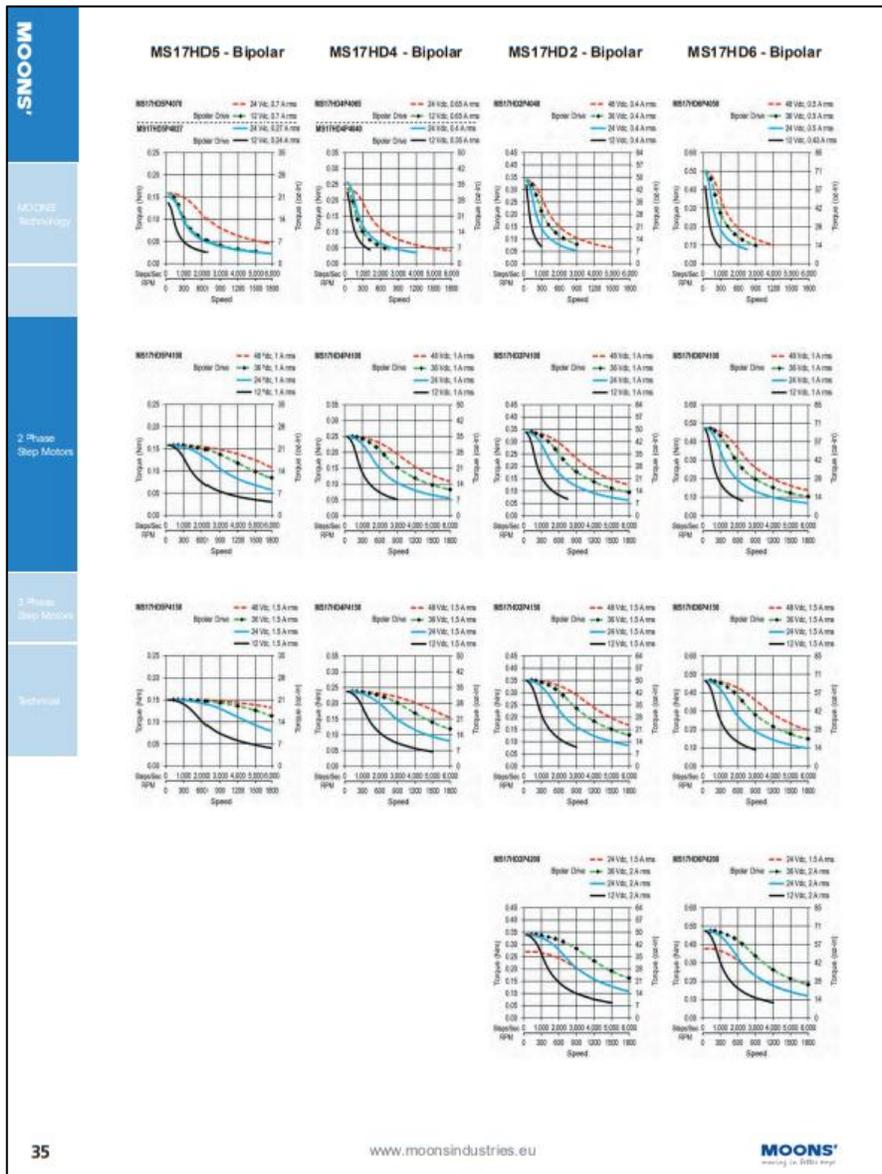
Length	Model Number	Connect	Rated Current	Holding Torque		Winding Ohms		Detent Torque	Rotor Inertia		Motor Weight	
				Amps (mounted)	Nm Typ. oz-in TYP.	±10% @20°C	Typ.		mNm oz-in	g cm ² oz-in ²	kg Lbs	
25.3 mm (1 in.)	MS17HD6P6030	P	0.3	0.16	23	40	25	5	0.71	20	0.11	0.15 0.33
	MS17HD6P6070	P	0.7	0.16	23	6.6	4.4					
	MS17HD6P6100	P	1	0.16	23	3.3	2.2					
34.3 mm (1.35 in.)	MS17HD4P6038	P	0.38	0.26	37	31	27	12	1.7	38	0.21	0.21 0.46
	MS17HD4P6085	P	0.85	0.24	34	5.1	4.5					
	MS17HD4P6120	P	1.2	0.25	35	2.9	2.5					
39.8 mm (1.57 in.) 1 Stack	MS17HD2P6040	P	0.4	0.38	54	28	31	15	2.1	57	0.31	0.28 0.62
	MS17HD2P6085	P	0.85	0.38	54	6	6.7					
	MS17HD2P6130	P	1.3	0.38	54	2.5	2.8					
48.3 mm (1.9 in.) 2 Stack	MS17HD6P6040	P	0.4	0.48	68	29	33	25	3.5	82	0.45	0.36 0.79
	MS17HD6P6080	P	0.8	0.49	69	7.6	8.6					
	MS17HD6P6130	P	1.3	0.51	72	3.2	3.6					
	MS17HD6P6200	P	2	0.50	71	1.3	1.4					

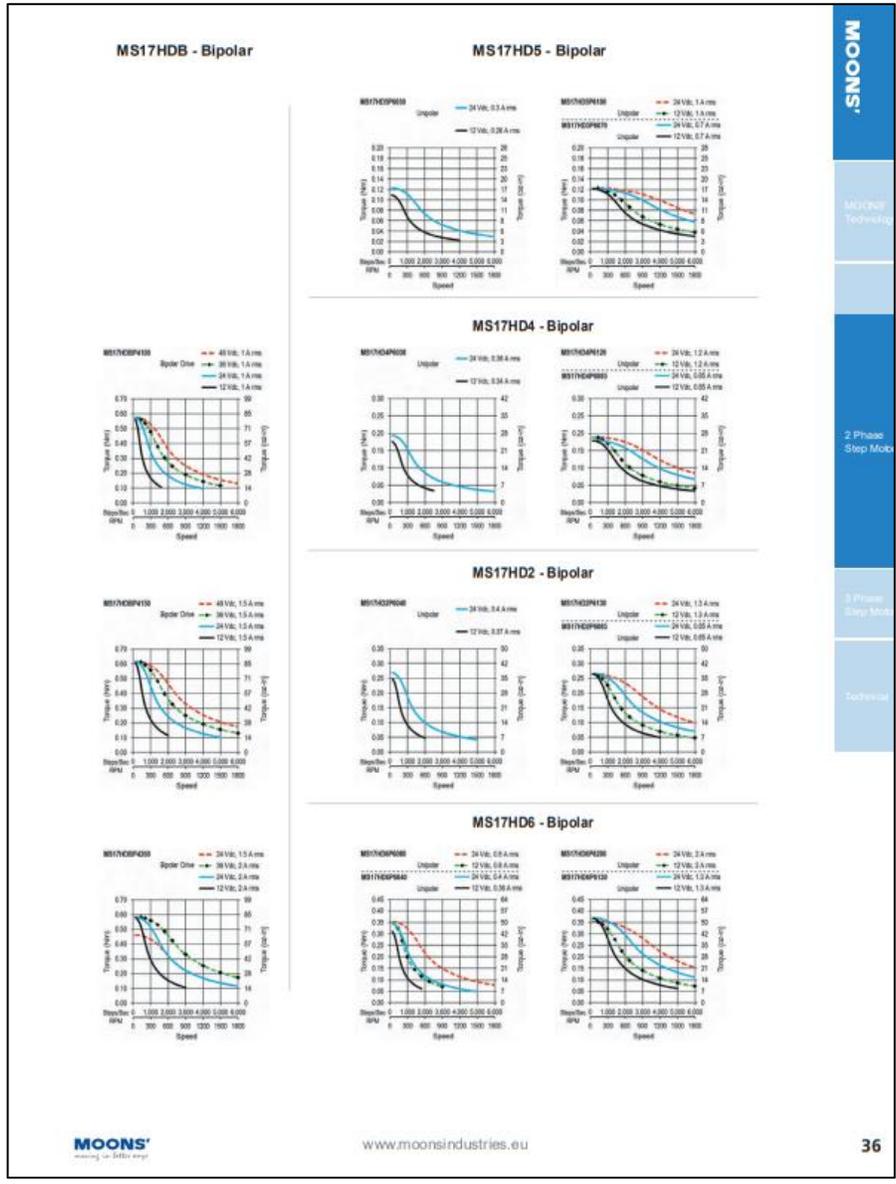
^ Preferred model

Mating Connector With Leads (order separately)

Dimensions: mm (in)







MOONS®
MOONS Technology
3 Phase Step Motor
3 Phase Step Motor
Technical

9.2.3 TB6600 Stepper motor driver.



TB6600
Stepper Motor Driver

**Analog Driver
Model TB6600**

Analog Technology, max. 40 VDC / 4.0 A (PEAK)



Product Description:
The TB6600 single axis drive is a low cost microstepping drive. It is suitable for driving 2-phase and 4-phase hybrid stepper motors. Not for professional applications.

Features:

- Cost-effective
- Supply voltage up to +40 VDC, Output current up to 4.0 A (PEAK)
- Output current selectable in 8 steps via DIP-switch
- Automatic idle-current reduction (in standstill mode) to reduce motor heating
- Pulse input frequency up to 20 kHz
- Input suitable for 5 V signals
- Inputs are optically isolated
- 6 selectable microstep resolutions, up to 6400 steps/rev with standard 1.8° motors
- Suitable for 2-phase and 4-phase motors
- Supports PUL/DIR mode
- Over current and overheat protection

Electrical Specifications:

Parameters	Min	Typ.	Max	Unit
Output current	0.7	-	4.0 (3.5 RMS)	A
Supply voltage	+9	+36	+40	VDC
Logic signal current	8	10	15	mA
Puls input frequency	0	-	20 when duty cycle is 25 high / 75 low 13 when duty cycle is 50 / 50	kHz
Insulation resistance	500			MΩ

Further Specifications:

Microsteps / 1,8 °	200		6400
PUL / DIR		yes	
NEMA sizes	17		24
Motor type Mechatron	42BYGH-XXXX		60BYGH-XXX

22.01.18

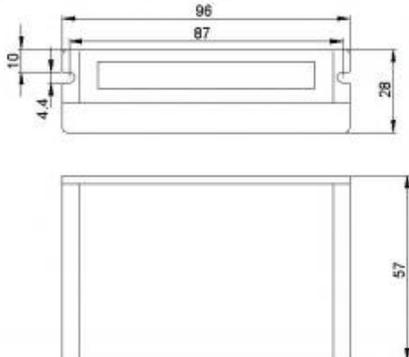
Right of techn. modifications is reserved
www.sorotec.de
Technische Änderungen vorbehalten



TB6600**Stepper motor driver**

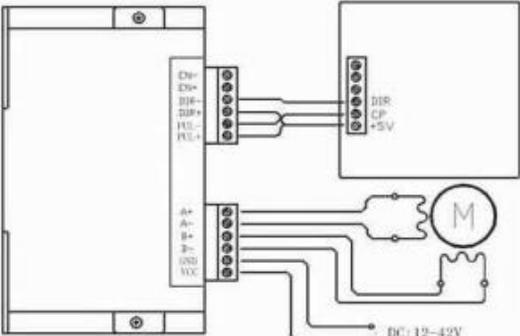
Analog Driver
Model TB6600

Mechanical Specifications: (Unit: mm)



Applications:
Suitable for a wide range of stepping motors of NEMA sizes 17, 23 and 24 (42x42 mm to 60x60 mm). It can be used in various kinds of machines, such as X-Y tables, engraving machines, labeling machines, laser cutters, pick-place devices, and so on. Particularly well suited for applications where low noise levels, less heat development, high speed and high precision are desired.

Typical Connection Schematic:
A typical system consists of stepper motor, stepper motor driver, power supply and controller. The following image shows a typical connection schematic:



Logic control signals which have 5 V can be connected directly;
R 1kΩ must be connected in line when control signal is 12V;
R 2kΩ must be connected in line when control signal is 24V to ensure control signal current is 8mA to 15mA.

22.01.18

Right of techn. modifications is reservedwww.sorotec.deTechnische Änderungen vorbehalten

9.2.4 Driver MOSFET IRF520.

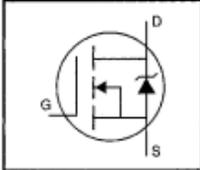


IRF520

PD-9.313K

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements



$V_{DSS} = 100V$

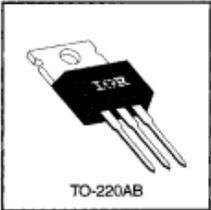
$R_{DS(on)} = 0.27\Omega$

$I_D = 9.2A$

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



TO-220AB

DATA SHEETS

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ $T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	9.2	A
I_D @ $T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	6.5	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	37	
P_D @ $T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	60	W
	Linear Derating Factor	0.40	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	200	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ①	9.2	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	6.0	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	5.5	V/ns
T_J	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
T_{STG}	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf-in (1.1 N-m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	2.5	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	62	

125

IRF520						IRF
Electrical Characteristics @ T _J = 25°C (unless otherwise specified)						
	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V _{DS(BR)}	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	V _{GS} =0V, I _D =250μA
ΔV _{DS(BR)} /ΔT _J	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.13	—	V/°C	Reference to 25°C, I _D =1mA
R _{DS(on)}	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	Ω	V _{GS} =10V, I _D =5.5A ④
V _{GS(th)}	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V _{DS} =V _{GS} , I _D =250μA
g _m	Forward Transconductance	2.7	—	—	S	V _{DS} =50V, I _D =5.5A ④
I _{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	V _{DS} =100V, V _{GS} =0V
		—	—	250		V _{DS} =80V, V _{GS} =0V, T _J =150°C
I _{DSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V _{GS} =20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V _{GS} =-20V
Q _g	Total Gate Charge	—	—	16	nC	I _D =9.2A
Q _{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	4.4		V _{DS} =80V
Q _{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	7.7		V _{GS} =10V See Fig. 6 and 13 ④
t _{st(on)}	Turn-On Delay Time	—	8.8	—	ns	V _{DS} =50V
t _r	Rise Time	—	30	—		I _D =9.2A
t _{st(off)}	Turn-Off Delay Time	—	19	—		R _θ =18Ω
t _f	Fall Time	—	20	—		R _θ =5.2Ω See Figure 10 ④
L _D	internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact 
L _S	internal Source Inductance	—	7.5	—		
C _{iss}	input Capacitance	—	360	—	pF	V _{GS} =0V
C _{oss}	Output Capacitance	—	150	—		V _{DS} =25V
C _{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	34	—		f=1.0MHz See Figure 5

Source-Drain Ratings and Characteristics						
	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I _S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	9.2	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I _{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	37		
V _{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	T _J =25°C, I _S =9.2A, V _{GS} =0V ④
t _{rr}	Reverse Recovery Time	—	110	260	ns	T _J =25°C, I _F =9.2A
Q _{rr}	Reverse Recovery Charge	—	0.53	1.3	μC	di/dt=100A/μs ④
t _{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L _S +L _D)				

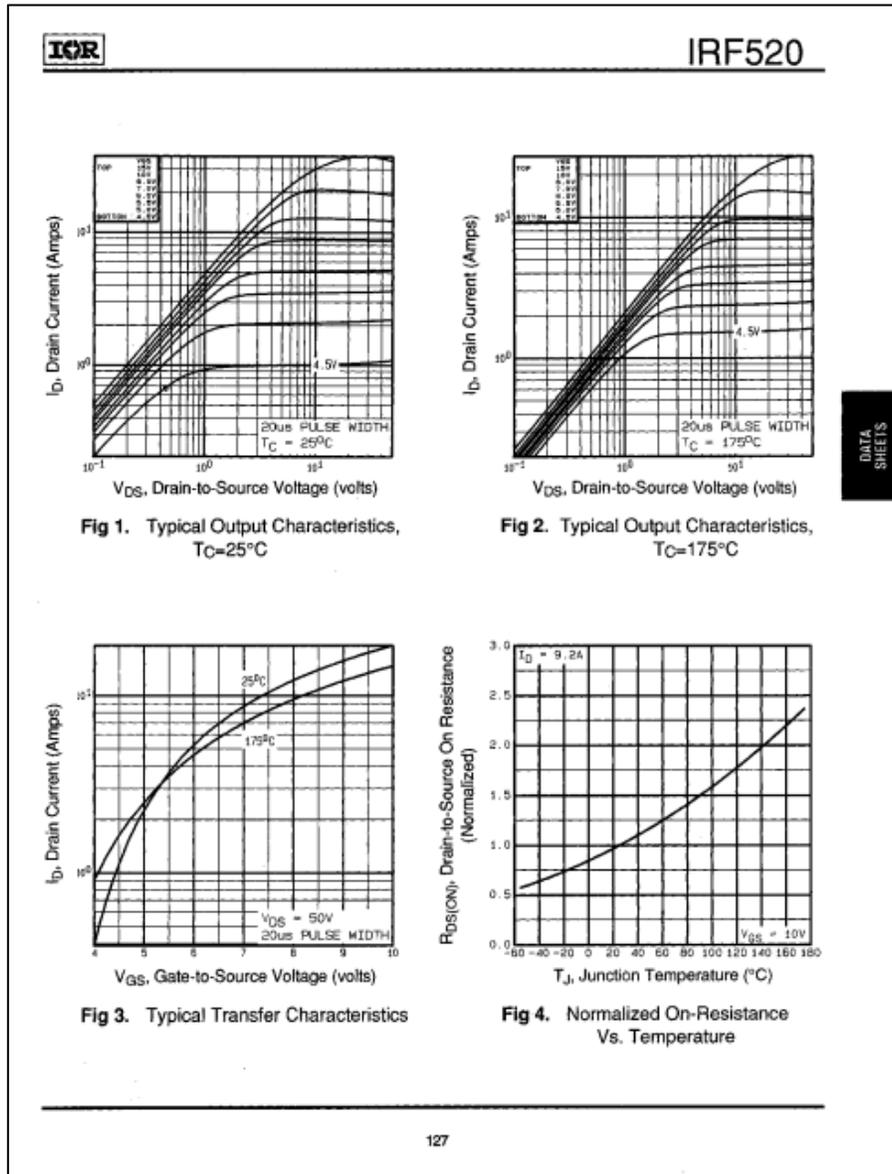
Notes:

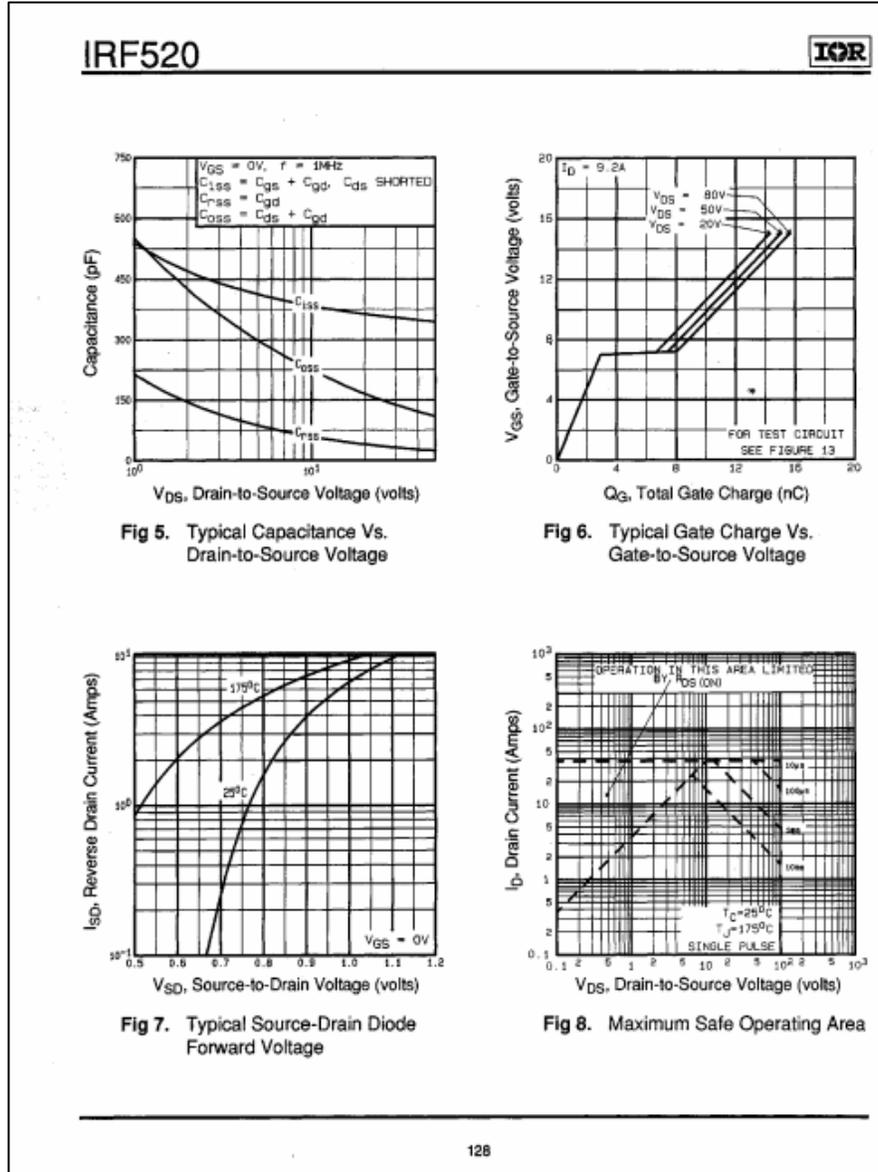
① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)

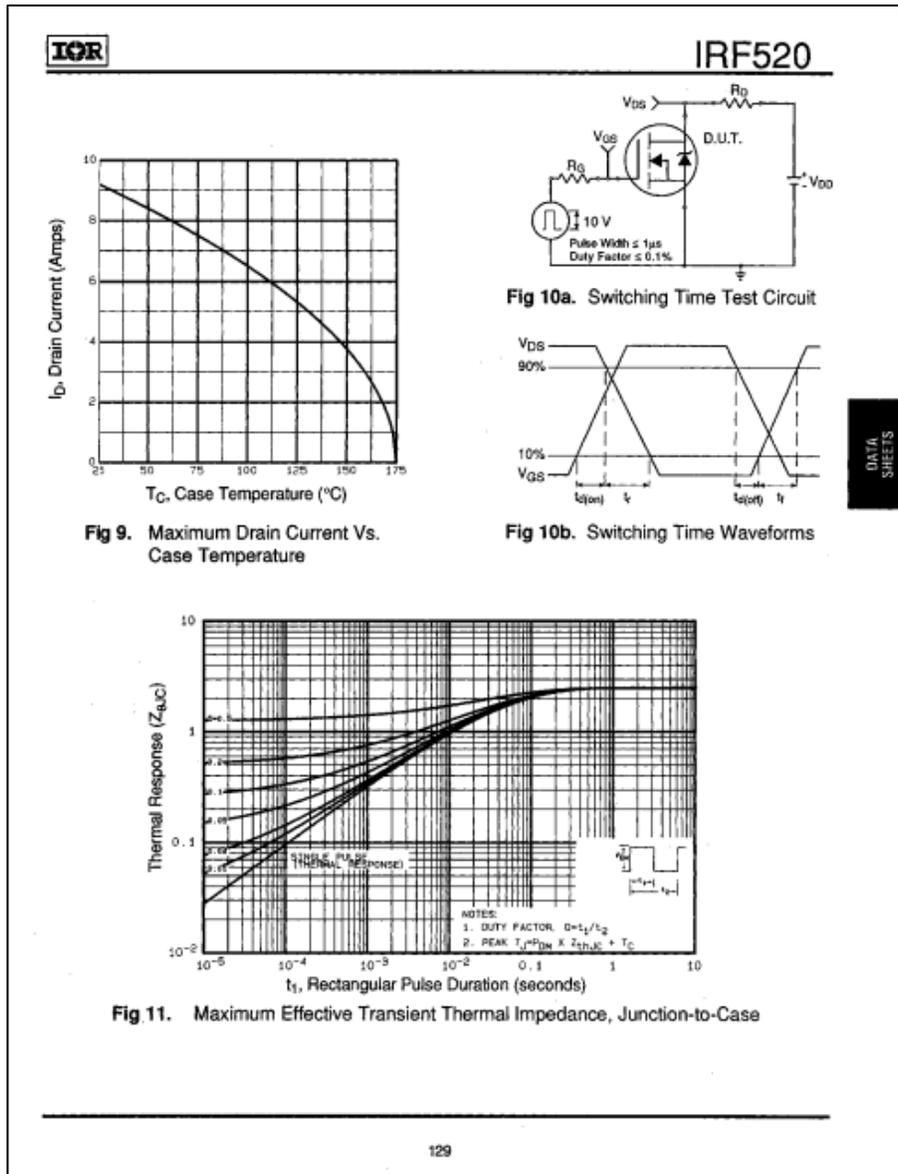
② V_{DS}=25V, starting T_J=25°C, L=3.5mH R_θ=25Ω, I_{AS}=9.2A (See Figure 12)

③ I_{SD}=9.2A, di/dt=110A/μs, V_{DS}≤V_{DS(BR)}, T_J≤175°C

④ Pulse width ≤ 300 μs; duty cycle ≤2%.







DATA SHEETS

IRF520

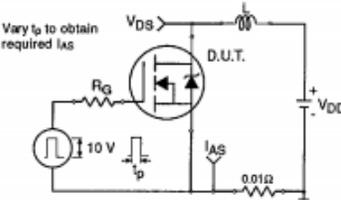



Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

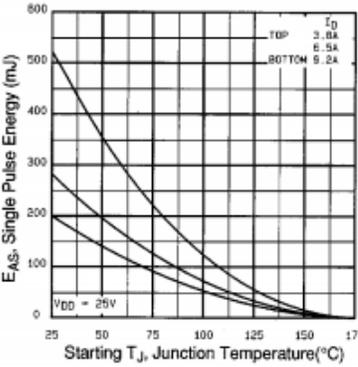


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

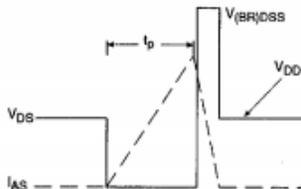


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

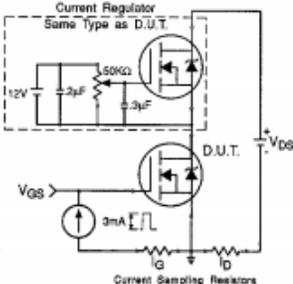


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

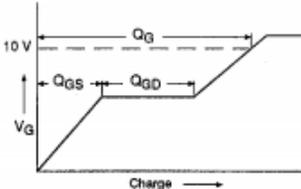


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

Appendix A: Figure 14, Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit – See page 1505

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1509

Appendix C: Part Marking Information – See page 1516

Appendix E: Optional Leadforms – See page 1525



130

9.2.5 Electroválvula solenoide 12 V.



Aqua Tech Trading Corp. Ltd, located in Chongqing, China, which is focused on developing, manufacturing and distributing water valves and associated water used equipments.

We are a rapidly expanding company perceived as a growing force in the area of fluid control, we attribute our success to extensive product knowledge, our understanding of and responsiveness to market requirements and the value we place on excellent customer service.

Aqua Valves have been widely used in agriculture, water supply, water control and water purification industries.

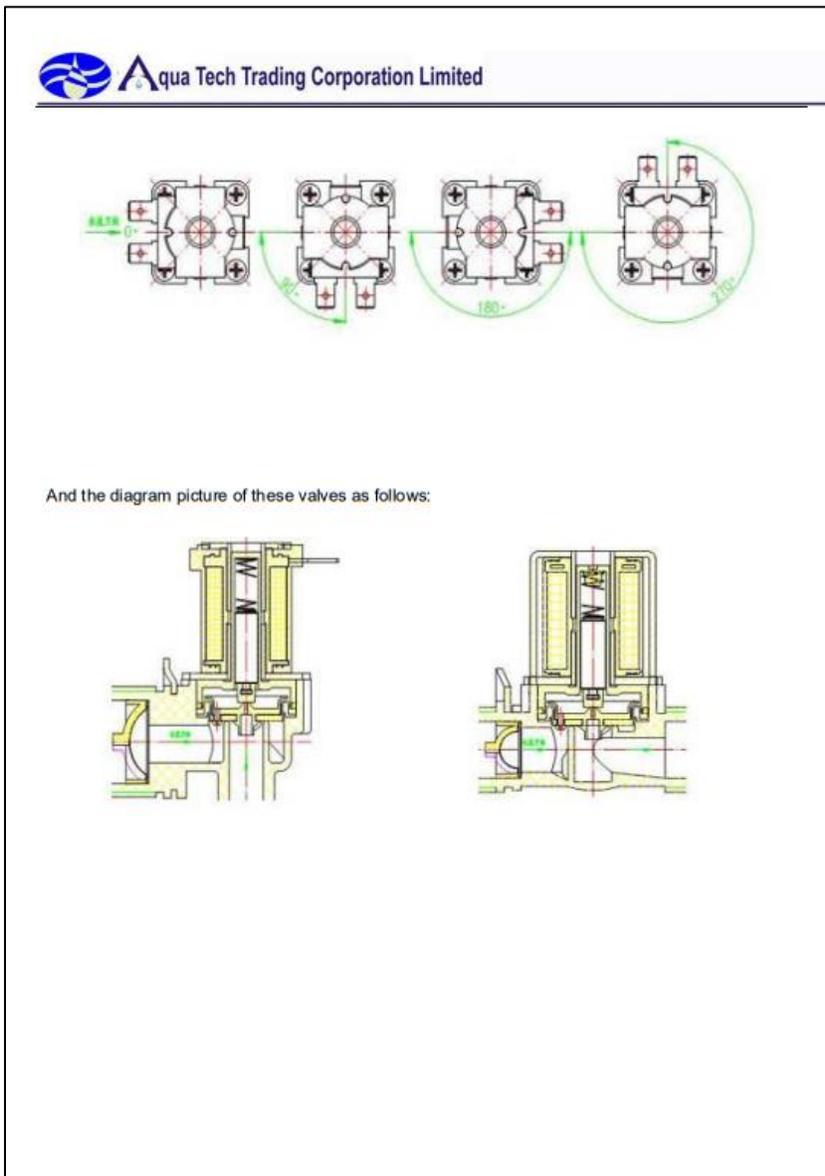
The following products are our solenoid valves.




Model No.	AQT15S	Model No.	AQT15SC
Thread Size	1/2" BSP inlet and outlet	Thread Size	1/2" BSP inlet and outlet
Material	PET	Material	PET
Working Temp	0-40°C	Working Temp	0-40°C
Working Pressure	0.02~0.8MPa	Working Pressure	0.02~0.8MPa
Voltage	DC12V,DC24V,AC220V	Voltage	AC/DC 6/9/12/24/36/110/220V
Voltage Range	15%	Voltage Range	15%
Style	Closed Valve	Style	Closed Valve
Working Environment	Water, Gas and Oil	Working Environment	Water, Gas and Oil
Lifespan	More than 200,000 times	Lifespan	More than 200,000 times
Certification	CQC/CE	Certification	CQC/CE
Usage:			
Suit for many kinds of washing machine, drinking water machine, sanitary equipment, water heater, etc. Our products have passed CQC and CE. And it meets the requirement of WEEE and RoHS.			

			
			
Model No.	AQT10S	Model No.	AQT15SL
Thread Size	1/2"10mm BSP inlet and outlet	Thread Size	1/2" BSP inlet and outlet
Material	Plastic and Brass	Material	Plastic and Brass
Working Temp	0-60/100 °C	Working Temp	0-100 °C
Working Pressure	0.02-0.8MPa, static pressure ≥ 2.0MPa	Working Pressure	400 millimeter water column
Voltage	DC 12V,DC24V,AC220V	Voltage	AC/DC 6/9/12/24/36/110/220V
Voltage Range	15%	Voltage Range	15%
Style	Closed Valve	Style	Opened Valve
Working Environment	Water, Gas and Oil	Working Environment	Water, Gas and Oil
Lifespan	More than 200,000 times	Lifespan	More than 200,000 times
Certification	CQC/CE	Certification	CQC/CE
Usage:	washing machine used solenoid valve	Usage:	Specially working in low pressure environment
			
Model No.	AQT12SL	Model No.	AQT12SLT
Thread Size	1/2"BSP inlet and 12mm outlet	Thread Size	1/2"BSP inlet and 12mm outlet
Material	Plastic and Brass	Material	Plastic and Brass
Working Temp	0-100 °C	Working Temp	0-100 °C
Working Pressure	400 millimeter water column	Working Pressure	400 millimeter water column
Voltage	DC 12V,DC24V,AC220V	Voltage	AC/DC 6/9/12/24/36/110/220V
Voltage Range	15%	Voltage Range	15%
Style	Opened Valve	Style	Opened Valve
Working Environment	Water, Gas and Oil	Working Environment	Water, Gas and Oil
Lifespan	More than 200,000 times	Lifespan	More than 200,000 times
Certification	CQC/CE	Certification	CQC/CE

			
<p>Usage: Specially working in low pressure environment</p>			
			
<p>Usage: Specially working in low pressure environment</p>			
			
Model No.	AQT15SCB	Model No.	AQT15SP
Thread Size	1/2"BSP inlet and let	Thread Size	1/2"BSP inlet and 12mm outlet
Material	Brass	Material	Plastic
Working Temp	0-100 °C	Working Temp	1°C-75 °C
Working Pressure	0.02-0.8MPa	Flow rate	0.02Mpa ≥ 3 L/min, 0.1Mpa ≥ 12 L/min, 0.8Mpa ≥ 35 L/min
Voltage	DC 12V,DC24V,AC220V	Voltage	AC220V
Voltage Range	15%	Voltage Range	15%
Style	Closed Valve	Resistance Coil	4.75K Ω ± 0.25K Ω (20°C)
Working Environment	Water, Gas and Oil	Working Environment	Water
Lifespan	More than 200,000 times	Lifespan	More than 1,000,000times
Certification	CQC/CE	Certification	0
<p>Usage: Specially working in low pressure environment</p>		<p>Usage: Water used solenoid valve</p>	



9.3 Anexo A. Carta Gantt del plan de trabajo a seguir para la ejecución del proyecto.

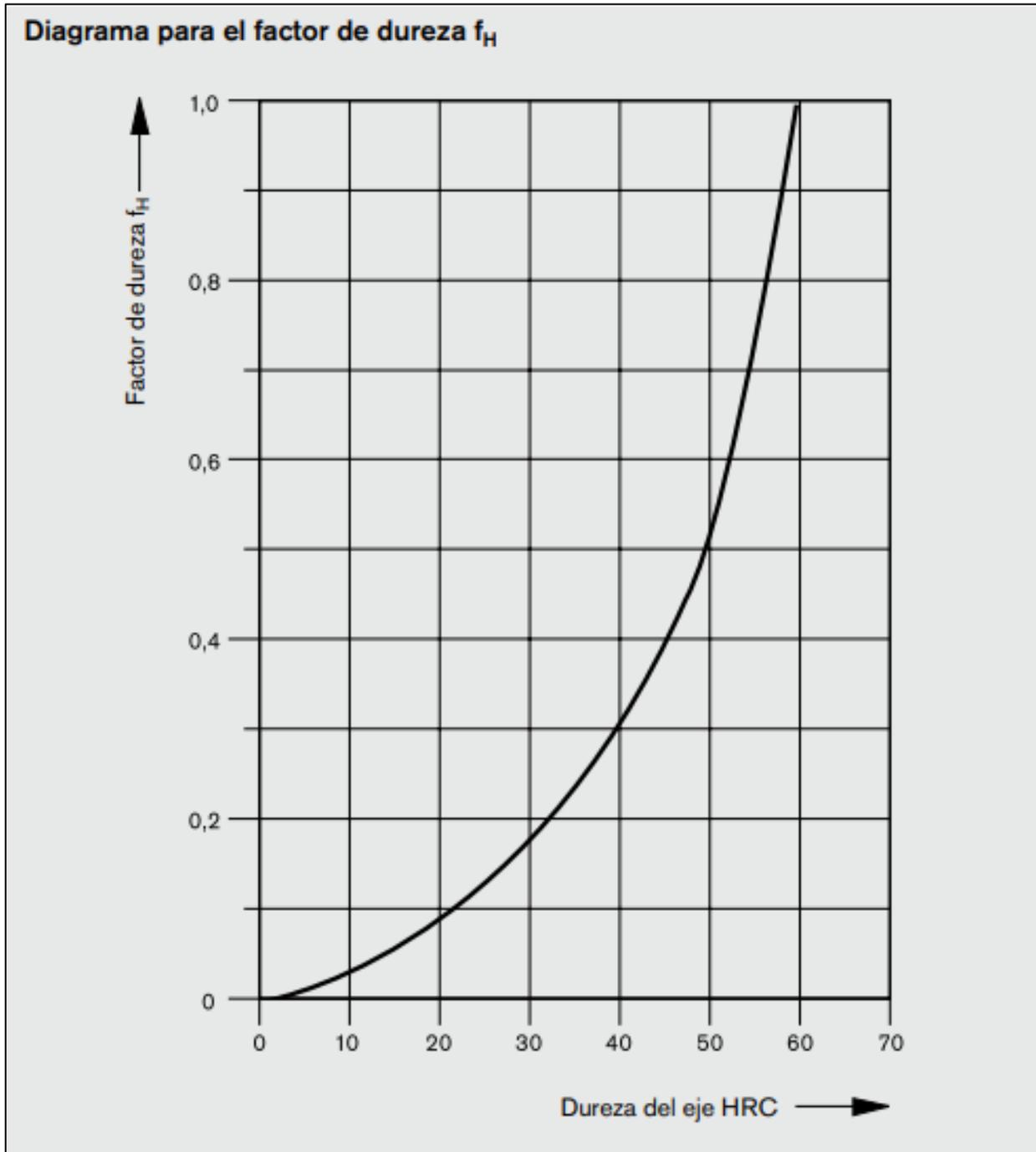
PROYECTO	ESTUDIANTE												PROFESOR GUÍA			
	Jorge Enrique Correa Oyarce												AÑO			
OBJETIVO GENERAL	2019															
Diseño de un sistema automatizado de pulverización superficial en PV	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ESTADO DEL ART																
Tipo de paneles fotovoltaicos											X					
Energía fotovoltaica en Chile											X					
Efecto de la suciedad sobre paneles fotovoltaicos											X					
Métodos de limpieza											X					
Recubrimientos											X					
Recubrimiento en vidrio											X					
Método de pulverización directa											X					
Pulverización directa en vidrio											X					
Tiros de boquillas para pulverización											X					
Aplicaciones de TiO2											X					
Métodos de aplicación											X					
Uso TiO2 en vidrio											X					
OBJETIVOS ESPECÍFICOS																
Selección mecanismo de transmisión											X					
Determinar espesor teórico del recubrimiento											X					
Determinar velocidad lineal de pulverizadores											X					
Plano P & D instrumentación											X					
Selección componentes mecánicos											X					
Selección componentes eléctricos-electrónicos											X					
Estudio materiales y costos prototipo											X					
PRUEBAS EXPERIMENTALES																
constitución prototipo de pruebas experimentales																
CONSTRUCCIONES																
Solicitud de dinero escuela AYT																
COMPAS																
Ensamble mecánico																
Ensamble eléctrico																
Programación																
Pruebas empíricas																
Validación de supuestos																
Módulos	Taller de integración y proyecto de memoria															

9.4 Tabla utilizada para realizar cálculos de velocidad lineal de pulverizado.

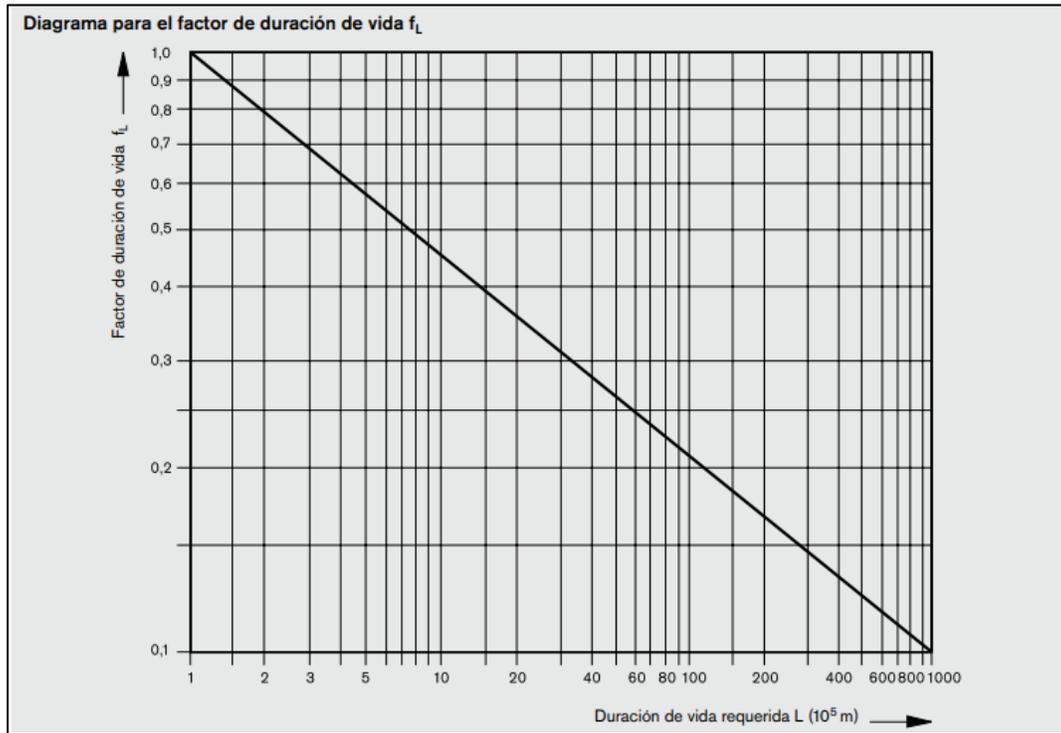
Tabla 22: Velocidades lineales necesarias para el actuador dependientes del espesor seleccionado. Fuente: Elaboración propia.

Capa delgada									
Espesor (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Volumen (mm ³)	Volumen (lts)	Tiempo de exposición(s)	velocidad lineal (m/s)	RPM	Aceleración (m/s ²)	
0,003	670	1140	2291,40000000	0,00229140	0,10	6,73	3407	67,5039	
0,006	670	1140	4582,80000000	0,00458280	0,20	3,36	1703	16,8760	
0,009	670	1140	6874,20000000	0,00687420	0,30	2,24	1136	7,5004	
0,012	670	1140	9165,60000000	0,00916560	0,40	1,68	852	4,2190	
0,015	670	1140	11457,00000000	0,01145700	0,50	1,35	681	2,7002	
0,018	670	1140	13748,40000000	0,01374840	0,60	1,12	568	1,8751	
0,021	670	1140	16039,80000000	0,01603980	0,70	0,96	487	1,3776	
0,024	670	1140	18331,20000000	0,01833120	0,80	0,84	426	1,0547	
0,027	670	1140	20622,60000000	0,02062260	0,90	0,75	379	0,8334	
0,030	670	1140	22914,00000000	0,02291400	1,00	0,67	341	0,6750	
0,033	670	1140	25205,40000000	0,02520540	1,10	0,61	310	0,5579	
0,036	670	1140	27496,80000000	0,02749680	1,20	0,56	284	0,4688	
0,039	670	1140	29788,20000000	0,02978820	1,30	0,52	262	0,3994	
0,042	670	1140	32079,60000000	0,03207960	1,39	0,48	243	0,3444	
0,045	670	1140	34371,00000000	0,03437100	1,49	0,45	227	0,3000	
0,048	670	1140	36662,40000000	0,03666240	1,59	0,42	213	0,2637	
0,051	670	1140	38953,80000000	0,03895380	1,69	0,40	200	0,2336	
0,054	670	1140	41245,20000000	0,04124520	1,79	0,37	189	0,2083	
0,057	670	1140	43536,60000000	0,04353660	1,89	0,35	179	0,1870	

9.5 Diagrama de factor de dureza f_H de ejes lineales.



9.6 Influencia de la duración de vida en rodamientos lineales.



9.7 Capacidad de carga en rodamientos lineales.

Medidas (mm) Eje	Capacidades de carga (N)							
	Rodamiento lineal Compacto, eLINE		Rodamiento lineal Super S, B		Rodamiento lineal Estándar		Rodamiento lineal Segmentario	
$\varnothing d$	C	C_0	C	C_0	C	C_0	C	C_0
3	-	-	-	-	55	45	-	-
4	-	-	-	-	70	60	-	-
5	-	-	-	-	180	140	-	-
8	500	350	-	-	320	240	-	-
10	600	410	600	330	300	260	-	-
12	730	420	830	420	420	280	480	420
14	760	430	-	-	-	-	-	-
16	950	500	1020	530	580	440	720	620
20	1120	610	2020	1050	1170	860	1020	870
25	2330	1310	3950	2180	2080	1560	1630	1360
30	3060	1880	4800	2790	2820	2230	2390	1960
40	5040	3140	8240	4350	5170	3810	3870	3270
50	5680	3610	12060	6470	8260	6470	-	-
60	-	-	-	-	11500	9160	-	-
80	-	-	-	-	21000	16300	-	-

9.8 Códigos.

9.8.1 Arduino.

```

#define  DEBUG ( a ) // Para adquirir datos por monitor serial
#define  home_switch  7
#define  second_switch  4

#include  < AccelStepper . h >

// definir algunos steppers y los pasadores de la usarán
AccelStepper  stepper1 ( AccelStepper  :: DRIVER , 10 , 9 ) ; // Por
defecto es AccelStepper  :: FULL4WIRE (4 pines) en 2, 3, 4, 5
const  int  N = 2 ; // Cantidad de datos cadena adquisición de datos

hogar_inicial  largo = - 1 ;
int  VELHOM = 150 ; // Velocidad Home 200 pasos por segundo

flotador  VEL = 0 ;
int  pasadas = 0 ;

int  SOLEN = A0 ; // Pines habilitar valvula

int  EN = 8 ; // definir Enable Pin

int  p = 0 ;
int  a = 1 ;

int  conjunto  largo  [ N ] ; // Cadena de set point vel y pasadas

int  una vez = 1 ;

char  x = 0 ; // Seleccion de caso a ejecutar
int  t = 0 ;
int  k = 0 ;
rpm  flotante  = 0 ; flotar  Pseg = 0 ;

// Constantes maquina para definir RPM
float  Q = 0.000009833333 ; // (m3 / s) = 0.59 LT / min
flotador  dpolea = 0.0377 ; // (m)
float  pi = 3.14156 ;
flotador  A = 1,14 ; // (m) Ancho de recubrimiento -> 110 ° boquilla a
40 cm de h

configuración  vacía ( )
{

```

```

pinMode ( 2 , ENTRADA ) ; // Sensor de velocidad
pinMode ( 11 , INPUT ) ; // PWM

Serial . comenzar ( 9600 ) ;
pinMode ( interruptor_inicio , INPUT_PULLUP ) ;
pinMode ( segundo_interruptor , INPUT_PULLUP ) ;
pinMode ( SOLEN , SALIDA ) ;

    paso a paso 1 . setMaxSpeed ( VELHOM ) ; // Pasos por segundo
    stepper1 . setAcceleration ( VELHOM ) ;

// SET HOMING
de serie . println ( "Haciendo Homming ....." ) ;

while ( ! digitalRead ( second_switch ) ) {
    stepper1 . moveTo ( - inicio_inicial ) ;
    initial_homing ++ ;
    paso a paso 1 . ejecutar ( ) ;
    retraso ( 5 ) ;
} paso a
pasol . setCurrentPosition ( 0 ) ;
paso a paso 1 . setMaxSpeed ( VELHOM ) ;
paso a paso 1 . setAcceleration ( VELHOM ) ;
hogar_inicial = 1 ;

while ( digitalRead ( home_switch ) ) {
    stepper1 . moveTo ( inicio_inicial ) ;
    initial_homing ++ ;
    paso a paso 1 . ejecutar ( ) ;
    retraso ( 5 ) ;
} paso a
pasol . setCurrentPosition ( 0 ) ;
paso a paso 1 . setMaxSpeed ( VELHOM ) ;
paso a paso 1 . setAcceleration ( VELHOM ) ;
hogar_inicial = 1 ;

while ( ! digitalRead ( home_switch ) ) {
    stepper1 . moveTo ( inicio_inicial ) ;
    paso a paso 1 . ejecutar ( ) ;
    initial_homing ++ ;
    retraso ( 5 ) ;
}

paso a paso 1 . setCurrentPosition ( 0 ) ;
Serial . println ( "Homing OK" ) ;

}

bucle vacío ( )
{
    Serial . comenzar ( 9600 ) ;

```

```

    establecer [ 0 ] = 0 ;
    establecer [ 1 ] = 0 ;
    VEL = 0 ;
    pasadas = 0 ;
    para ( int k = 0 ; k < N - 1 ; k ++ ) ;
    {
    Serial . println ( "Ingrese Espesor en Um" ) ;
    retraso ( 2 ) ;
    while ( Serial . disponible ( ) <= 0 ) { } ;
    set [ 0 ] = Serie . parseInt ( ) ;
    }

    // RPM = (Q (m3 / s) * 60) / (π * d (m) * A (m) * b (m)) Funcion para
    definir velocidad
    // Q = 0,59 LT / min = 0.0000098333333 ( m3 / s)
    // dpolea = 0.0377
    // pi = 3.14156
    // A = 1.14 (m) Ancho de recubrimiento teorico -> 110 ° boquilla a 40 cm
    de h
    // b = setpoint (m) espesor de recubrimiento m-> um m * 10 ^ 6

    rpm = ( 60 * Q ) / ( A * pi * dpolea * ( conjunto [ 0 ] / 1e + 6 ) ) ;
    Serial . imprimir ( establecer [ 0 ] ) ;
    Serial . println ( " uM " ) ;

    Serial . fin ( ) ;
    Serial . comenzar ( 9600 ) ;

    Pseg = ( rpm * 400 ) / ( 60 ) ;
    VEL = Pseg ; // VEL debe ser pasos / seg

    Serial . println ( "Ingrese Pasadas" ) ;
    retraso ( 2 ) ;

    while ( Serial . disponible ( ) == 0 ) { } ;
    set [ 1 ] = Serie . parseInt ( ) ;

    Serial . imprimir ( "Pasadas:" ) ;
    Serial . println ( conjunto [ 1 ] ) ;
    pasadas = conjunto [ 1 ] ;

    paso a paso 1 . setMaxSpeed ( VEL ) ; // Pasos por segundo 200 pasos = 1
    vuelta
    stepper1 . setAcceleration ( VEL / 2 ) ;

    Serial . fin ( ) ;
    Serial . comenzar ( 9600 ) ;
    
```

```
Serial . println ( "Ingrese caso" ) ;
retraso ( 10 ) ;
while ( Serial . disponible ( ) == 0 ) { } ;
x = Serie . leer ( ) ;

Serial . print ( "Caso:" ) ;
Serial . println ( x ) ;

if ( x == 'a' ) {          // Caso 1 hacer homming

    paso a paso 1 . setMaxSpeed ( VELHOM ) ; // Pasos por segundo
    stepper1 . setAcceleration ( VELHOM ) ;

// SET HOMING
de serie . println ( "Haciendo Homming ....." ) ;

while ( ! digitalRead ( second_switch ) ) {
    stepper1 . moveTo ( - inicio_inicial ) ;
    initial_homing ++ ;
    paso a paso 1 . ejecutar ( ) ;
    retraso ( 5 ) ;
} paso a
pasol . setCurrentPosition ( 0 ) ;
paso a paso 1 . setMaxSpeed ( VELHOM ) ;
paso a paso 1 . setAcceleration ( VELHOM ) ;
hogar_inicial = 1 ;

while ( digitalRead ( home_switch ) ) {
    stepper1 . moveTo ( inicio_inicial ) ;
    initial_homing ++ ;
    paso a paso 1 . ejecutar ( ) ;
    retraso ( 5 ) ;
} paso a
pasol . setCurrentPosition ( 0 ) ;
paso a paso 1 . setMaxSpeed ( VELHOM ) ;
paso a paso 1 . setAcceleration ( VELHOM ) ;
hogar_inicial = 1 ;

while ( ! digitalRead ( home_switch ) ) {
    stepper1 . moveTo ( inicio_inicial ) ;
    paso a paso 1 . ejecutar ( ) ;
    initial_homing ++ ;
    retraso ( 5 ) ;
}

paso a paso 1 . setCurrentPosition ( 0 ) ;
Serial . println ( "Homing OK" ) ;

}
```

```
else if ( x == 'b' ) { // caso 2 ejecutar maquina
  Serial . println ( " EJECUTAR ....." ) ;
  Serial . imprimir ( "VEL:" ) ;
  Serial . imprimir ( rpm ) ;
  Serial . println ( "RPM" ) ;
  retraso ( 1500 ) ;

  para ( p = 0 ; p < pasadas ; p ++ ) {

    Serial . imprimir ( "Pasada:" ) ;
    Serial . println ( p + 1 ) ;
    digitalWrite ( SOLEN , ALTO ) ; // Valvula encendida

paso a paso 1 . setMaxSpeed ( VEL ) ;
paso a paso 1 . setAcceleration ( VEL * 1.3 ) ;

    paso a paso 1 . mover ( - 400 * 5,46 ) ; // pasos por vuelta *
cantidad de vueltas
    stepper1 . runToPosition ( ) ;
    paso a paso 1 . detener ( ) ;

paso a paso 1 . setMaxSpeed ( VEL ) ;
paso a paso 1 . setAcceleration ( VEL * 1.3 ) ;

    paso a paso 1 . mover ( 400 * 5,46 ) ; // pasos por vuelta * cantidad
de vueltas
    stepper1 . runToPosition ( ) ;

    paso a paso 1 . detener ( ) ;

  }
  digitalWrite ( SOLEN , BAJO ) ; // Valvula encendida

Serial . fin ( ) ;
}

else if ( x == 'c' ) { // Sistema Lavar

  paso a paso 1 . setMaxSpeed ( VELHOM ) ; // Pasos por segundo
  stepper1 . setAcceleration ( VELHOM ) ;

// SET lavado
  Serial . println ( "Lavado sistema ....." ) ;

  paso a paso 1 . mover ( - 400 * 5,46 ) ; // pasos por vuelta *
cantidad de vueltas
  stepper1 . runToPosition ( ) ;
  paso a paso 1 . detener ( ) ;
```

```
    retraso ( 10 ) ;

    digitalWrite ( SOLEN , ALTO ) ;    // Valvula encendida
    retardo ( 20000 ) ;
    digitalWrite ( SOLEN , BAJO ) ;    // Valvula encendida
    retardo ( 10000 ) ;

paso a paso 1 . setMaxSpeed ( VELHOM ) ;
paso a paso 1 . setAcceleration ( VELHOM ) ;

    paso a paso 1 . mover ( 400 * 5,46 ) ; // pasos por vuelta * cantidad
de vueltas
    stepper1 . runToPosition ( ) ;
    paso a paso 1 . detener ( ) ;
Serial . println ( "Lavado OK" ) ;

    Serial . fin ( ) ;
}

}
```

9.8.2 Código interfaz gráfica y comunicación con Arduino, Visual studio 2019.

```
Imports System.IO.Ports
Imports System.Threading
Imports System.Xml

Public Class Form1
    Dim dato As String
    Dim pasadas As Double 'Variable que define cantidad de pasadas de la maquina
    Dim espesor As Double 'Variable que define espesor por pasada

    Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load
        buscapuerto()
    End Sub

    Private Sub buscapuerto()
        Try
            ComboBox1.Items.Clear()
            For Each puerto As String In My.Computer.Ports.SerialPortNames
                ComboBox1.Items.Add(puerto)
            Next
            If ComboBox1.Items.Count > 0 Then
                ComboBox1.SelectedIndex = 0
            Else
                MsgBox("no hay puertos disponibles")
            End If
        Catch ex As Exception
            MsgBox(ex.Message, MsgBoxStyle.Critical)
        End Try
    End Sub

    Private Sub SerialPort1_DataReceived(sender As Object, e As
    SerialDataReceivedEventArgs) Handles SerialPort1.DataReceived
        dato = SerialPort1.ReadLine() 'La variable dato recibe la cadena de
        caracteres de ardino sensor DHT22
        espesor = CDb1(Val(dato)) 'Dato tipo String se convierte en tipo Double para
        ser visualizado en visual studio

        CheckForIllegalCrossThreadCalls = False 'Es una propiedad de control para
        desbloquear cualquier interrupcion en la lectura de los datos
        TextBox3.Text = "Recibido>> " & dato
        CheckForIllegalCrossThreadCalls = False 'Es una propiedad de control para
        desbloquear cualquier interrupcion en la lectura de los datos
    End Sub
End Class
```

```
End Sub

Private Sub Button1_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Button1.Click
    Try
        With SerialPort1
            .BaudRate = 9600
            .DataBits = 8
            .Parity = IO.Ports.Parity.None
            .StopBits = 1
            .PortName = ComboBox1.Text
            .Open()
            If .IsOpen Then
                Label2.Text = "CONECTADO"
            Else
                MsgBox("CONEXION FALLIDA", MsgBoxStyle.Critical)
            End If
        End With
    Catch ex As Exception
        MsgBox(ex.Message, MsgBoxStyle.Critical)
    End Try
End Sub

Private Sub Button2_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Button2.Click
    SerialPort1.Close()
    Label2.Text = "DESCONECTADO"
End Sub

Private Sub Button4_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Button4.Click
    SerialPort1.Close()
    SerialPort1.Dispose()
    Close()
End Sub

Private Sub Button3_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Button3.Click
    SerialPort1.Write("a") 'envía a por puerto serial homing'
End Sub

Private Sub Button5_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Button5.Click
    SerialPort1.Write("b") 'envía b por puerto serial start'

End Sub

Private Sub Button6_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Button6.Click
    SerialPort1.Write(TextBox2.Text) 'envia el valor de velocidad
End Sub

Private Sub Button7_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Button7.Click
    SerialPort1.Write(TextBox1.Text) 'envia el valor de pasadas
```

```
    espesor = CDb1(Val(TextBox2.Text))
    pasadas = CDb1(Val(TextBox1.Text))
    Dim x As Double
    x = espesor * pasadas * 2
    Label3.Text = "Espesor final: " & x & " [uM]"
End Sub

Private Sub Button8_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Button8.Click
    SerialPort1.Write("c") 'envía b por puerto serial start'
End Sub
End Class
```