

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

Diseño de un dispositivo para realizar un recubrimiento, a base de vanadio y matrices poliméricas con cristales líquidos colestéricos, en ventanas termocrómicas inteligentes.

Informe del Proyecto Final de Graduación para optar por el título de Ingeniería en Mantenimiento Industrial, con el grado académico de Licenciatura.

REALIZADO POR:

Evelyn Barquero Cambroneró

PROFESOR GUÍA:

Ing. Carlos Otárola Zúñiga

COORDINADOR DE PRÁCTICA:

Ing. Ignacio Del Valle Granados

Cartago Junio, 2022



CARRERA ACREDITADA POR CEAB

Canadian Engineering Accreditation Board

Bureau canadien d'accréditation des programmes d'ingénierie

Información general

Datos del estudiante

Nombre completo: Evelyn Barquero Cambronero.

Número de cédula: 2 0791 0230

Número de carné: 2017094120

Edad: 23 años

Números de teléfono: +506 88541818 / +506 24472553

Correos electrónicos: evelynbarquero@estudiantec.cr
evelynbarquero@gmail.com

Dirección exacta de domicilio: 600 metros Sur de la Esc. Manuel Quesada Bastos, Concepción, San Ramón, Alajuela.

Datos de la empresa

Nombre: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Actividad Principal: Docencia, investigación y extensión de la tecnología y ciencias conexas para el desarrollo de Costa Rica.

Dirección: Calle 15, Avenida 14, 1 km al Sur de la Basílica de los Ángeles, Cartago.

Teléfono: +506 2552 5333

Datos del proyecto

Nombre: Diseño de un dispositivo para realizar un recubrimiento, a base de vanadio y matrices poliméricas con cristales líquidos colestéricos, en ventanas termocrómicas inteligentes.

Asesora de la práctica: M.Sc. Natalia María Murillo Quirós.



[Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Dedicatoria

A mis padres, que siempre se han esforzado por darme lo mejor y que me han apoyado en todo momento, mostrándome su amor incondicional y siendo ambos un ejemplo a seguir como los extraordinarios seres humanos que son.

Agradecimientos

Quiero agradecer profundamente a mi familia, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida, gracias por ayudarme en los momentos que más los he necesitado y por alentarme a cumplir mis metas.

Agradezco a mis amigas y amigos, quienes me acompañaron en mi etapa universitaria y con quienes tengo los recuerdos más hermosos de esta época, siempre tendrán un lugar especial en mi corazón.

A mis profesores y compañeros, gracias por las enseñanzas y por inspirarme tanto en el área académica como en la profesional.

Al Ing. Carlos Otárola Zúñiga, quién me ayudó en varias ocasiones a lo largo de mi carrera universitaria, gracias por todo el conocimiento compartido, su dedicación y su guía durante el presente proyecto.

Y por último, a la profesora e investigadora M.Sc. Natalia Murillo Quirós, por la gran oportunidad que me brindó al depositar en mí su confianza con el presente proyecto, gracias también por ser un modelo a seguir para las mujeres que desean involucrarse en el área STEM.

Carta de aceptación de la empresa



Jueves 21 de Octubre, 2021

Ing. Ignacio del Valle Granados
Coordinador de Práctica Profesional
Escuela de Ingeniería Electromecánica
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Estimado Señor:

Reciba un cordial saludo. Por este medio se informa sobre la revisión de la propuesta del proyecto: “Diseño de un dispositivo para realizar un recubrimiento, a base de vanadio y matrices poliméricas con cristales líquidos colestéricos, en ventanas termocrómicas inteligentes”, perteneciente a la estudiante Evelyn Barquero Cambronero, cédula 207910230, carné 2017094120.

El anteproyecto se relaciona a la propuesta de tesis para optar por un grado y título en un doctorado académico en ingeniería, por parte de mi persona. Debido a esta razón, la propuesta de la estudiante posee una gran relevancia para el termino exitoso de la investigación doctoral. Por ende, mi persona hace constar la aprobación de dicho anteproyecto.

Queda en firme la aceptación del proyecto y mi disposición ante cualquier consulta o eventualidad. Agradezco su atención.

Atentamente:

NATALIA MARIA
NATALIA MARIA MURILLO
MURILLO QUIROS (FIRMA)
QUIROS (FIRMA) 2021.10.21
22:16:47 -06'00'

M. Sc. Natalia Murillo Quirós
Profesora e investigador del ITCR
Escuela de Física
nmurillo@itcr.ac.cr

Índice General

Información general	1
Datos del estudiante	1
Datos de la empresa	1
Datos del proyecto	1
Dedicatoria	2
Agradecimientos	3
Carta de aceptación de la empresa	4
Lista de abreviaciones	13
Resumen.....	15
Abstract	16
1. Introducción	17
2. Generalidades.....	18
2.1. Reseña de la empresa	18
2.1.1. Instituto Tecnológico de Costa Rica.....	18
2.1.2. Vicerrectoría de investigación y extensión del ITCR.....	19
2.2. Planteamiento del problema	20
2.3. Objetivos	22
2.3.1. Objetivo General.....	22
2.3.2. Objetivos Específicos.....	22
2.4. Justificación	23
2.5. Viabilidad	25
2.6. Alcance	26
2.7. Limitaciones	27
2.8. Metodología	28
2.9. Cronograma	30
3. Marco Teórico.....	31
3.1. Edificios de consumo energético nulo (NZEB)	31
3.2. Ventanas termocrómicas inteligentes	32
3.2.1. Matrices poliméricas.....	33
3.2.2. Cristales líquidos colestéricos.....	34
3.2.3. Recubrimiento a base de dióxido de vanadio (VO ₂).....	35
3.3. Propiedades ópticas, morfológicas y reométricas del recubrimiento a base de VO₂ que influyen en el diseño mecánico del dispositivo	37

3.3.1.	Tasa de transmisión de la luz visible (<i>Tlum</i>)	37
3.3.2.	Modulación solar (<i>ΔTsol</i>).....	38
3.3.3.	Espesor	39
3.3.4.	Estequiometría en los elementos que conforman al recubrimiento.	40
3.3.5.	Curado UV	41
3.3.6.	Viscosidad.....	42
3.4.	Conceptos relacionados al diseño de la matriz ranurada (Slot Die Coater)	44
3.4.1.	Componentes del cabezal ranurado	45
3.4.2.	Caudal de suministro.....	47
3.4.3.	Caída de presión dentro de la estructura del cabezal	48
3.4.4.	Configuración y dimensiones de las cuchillas (<i>upstream lip</i> y <i>downstream lip</i>)....	48
3.4.5.	Configuración y dimensiones del <i>manifold</i>	50
3.4.6.	Ecuaciones de Navier-Stokes.....	52
3.4.7.	Perfiles de velocidad dentro del cabezal y su relación con el espesor de la película formada 53	
3.5.	Conceptos propios del diseño mecánico	54
3.5.1.	Grados de libertad (GDL)	54
3.5.2.	Principio de D'Alembert.....	54
3.5.3.	Esfuerzos cortantes y axiales	55
3.5.4.	Criterio de falla (Von Mises)	57
3.5.5.	Análisis a fatiga (Método ED-Goodman)	58
3.5.6.	Lubricación en mecanismos.....	60
3.5.7.	Sujeciones fijas y removibles.....	60
3.5.8.	Tornillos de potencia.....	61
3.5.9.	Cojinetes y rodamientos.....	62
3.5.10.	Motores a pasos	63
3.5.11.	Plan de mantenimiento basado en confiabilidad (RCM)	64
3.5.12.	Herramientas de simulación	64
4.	Comportamiento del recubrimiento y requerimientos del dispositivo	67
4.1.	Características del recubrimiento	67
4.2.	Parámetros técnicos y estructurales del dispositivo	69
5.	Selección de propuesta de diseño	71
5.1.	Selección preliminar de alternativas (Técnica de recubrimiento)	71
5.2.	Selección final de alternativas (Accionamiento lineal y Modulación de altura)	77

5.3. Comparativa con modelos existentes en el mercado	81
6. Diseño de la propuesta seleccionada.....	84
6.1. Diseño del cabezal	85
6.1.1. Componentes del cabezal.....	85
6.1.2. Parámetros específicos del funcionamiento del cabezal	88
6.2. Diseño los actuadores lineales	94
6.2.1. Diseño de los ejes (Análisis estático).....	95
6.2.2. Diseño de los ejes (Análisis de fatiga).....	100
6.2.3. Selección de motores y sus acoples	104
6.2.4. Selección de rodamientos	108
6.3. Simulación y propuesta detallada	110
7. Plan de mantenimiento basado en RCM.....	114
8. Conclusiones	118
9. Recomendaciones	119
10. Bibliografía	121
11. Anexos	125
11.1. Anexo 1: Cotización mecanizado del cabezal	125
11.2. Anexo 2: Cotización de rodamientos SKF 608-2RSH	126
12. Apéndices.....	127
12.1. Apéndice 1: Hoja de datos	127
12.2. Apéndice 2: Desglose de costos de materiales para cada propuesta	128
12.3. Apéndice 3: Memoria de cálculo	132
12.4. Apéndice 4: Resultados de simulación	147
12.5. Apéndice 5: Planos	149

Índice de Figuras

Figura 2.1. Desviación del problema planteado. Fuente: Elaboración propia.	21
Figura 2.2. Cronograma proyectado para la realización del proyecto. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 3.1. Vidrios portaobjetos recubiertos con sustancia a base de VO ₂ (concentraciones desde 0% hasta 10%), resultado de pruebas en laboratorio. Fuente: Elaboración propia.....	33
Figura 3.2. Estructura del cristal líquido colestérico. Fuente: (Oswald & Pieranski, 2005)	35
Figura 3.3. Funcionamiento de una ventana termocrómica. Fuente: (Alfonso, Agustín, & González-Elipe, 2019)	37
Figura 3.4. Efecto de la no estequiometría (eje x) en la T _c (eje y). Fuente: (Liu et al., 2018).....	41
Figura 3.5. Comportamiento de la velocidad en un fluido newtoniano en movimiento. Fuente: (Mott, 2015)	43
Figura 3.6. Comportamiento de fluidos newtonianos y no newtonianos. Fuente: (Mott, 2015) ..	44
Figura 3.7. Ejemplo de un Slot Die Coater. Fuente: Ossila.com	45
Figura 3.8. Estructura básica de un cabezal ranurado utilizado en la técnica slot die coating. Fuente: (Jin et al., 2016)	46
Figura 3.9. Dimensiones del cabezal. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 3.10. Formas de cuchillas en un Slot Die Coater. Fuente: (Ding, Liu & Harris, 2016)	49
Figura 3.11. Estructura interna de un Slot Die Coater. Fuente: (Jung & Nam, 2019).....	50
Figura 3.12. Configuraciones del manifold (cavidad) en un slot die coater: (a) entrada en el centro y manifold en forma de T, (b) entrada en extremo y manifold en forma T y (c) entrada en el centro y manifold en forma de colgador. Fuente: (Secor, 1997)	51
Figura 3.13. Ejemplo de las fuerzas internas y momentos internos en un cuerpo. Fuente: (Hibbeler, 2011).....	57
Figura 3.14. Diagrama de fuerzas en un tornillo de potencia. Fuente: (Norton, 2011)	61
Figura 5.1. Ejemplo de slot die coater para sustrato flexible, generalmente usado en aplicaciones industriales. Fuente: dcnano.com.....	72
Figura 5.2. Características del recubrimiento por inyección. Fuente: researchgate.net	73
Figura 5.3. Características del recubrimiento por aerosol. Fuente: researchgate.net	74
Figura 5.4. Indicador de altura. Fuente: mitutoyo.com.....	77

Figura 5.5. Ensamble preliminar del slot die coater (Alternativa 1.1). Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 5.6. Actuador lineal de varilla trapezoidal y tuerca. Fuente: thomsonlinear.com	78
Figura 5.7. Actuador lineal con husillo de bolas. Fuente:directindustry.es	79
Figura 5.8. Cabezal de empresa MTI Corporation (150 mm). Fuente: mtixtl.com	82
Figura 5.9. Slot die coater para laboratorio marca Ossila. Fuente: ossila.com.....	83
Figura 6.1. Ensamble final del diseño mecánico del dispositivo. Fuente: Elaboración propia. ...	84
Figura 6.2. Ensamble de la estructura que posee al cabezal. Fuente: Elaboración propia.....	87
Figura 6.3. Vista explosionada del sub ensamblaje “S1” (slot die head). Fuente: Elaboración propia.	87
Figura 6.4. Dimensiones del cabezal (repetición de figura 3.9). Fuente: Elaboración propia.....	89
Figura 6.5. Viscosidad absoluta en relación al perfil de velocidad en el cabezal. Fuente: Elaboración propia.	91
Figura 6.6. Ensamble del actuador. Fuente: Elaboración propia.	95
Figura 6.7. Isométrico del eje diseñado con sus respectivas cargas y reacciones. Fuente: Elaboración propia.	96
Figura 6.8. Diagrama de cuerpo libre del eje. Fuente: Elaboración propia.	97
Figura 6.9. Diagramas de fuerza cortante y momento flector para la varilla roscada. Fuente: Elaboración propia.	97
Figura 6.10. Factores a y b para el cálculo del factor de superficie. Fuente: (Budynas & Nisbett,2018).....	101
Figura 6.11. Valor de kc . Fuente: (Budynas & Nisbett,2018).....	102
Figura 6.12. Factor ke para un 99% de confiabilidad. Fuente: (Budynas & Nisbett,2018)	103
Figura 6.13. Características motor NEMA 17. Fuente: MicroJPM	107
Figura 6.14. Acople flexible 5mm a 8mm. Fuente: MicroJPM.com	108
Figura 6.15. Dimensiones y características del rodamiento rígido de bolas SKF 608-2RSH. Fuente: skf.com.....	108
Figura 6.16. Datos del cálculo del rodamiento rígido de bolas SKF 608-2RSH. Fuente: skf.com	109
Figura 6.17. Parámetros de selección de los rodamientos. Fuente: (SKF, 2015)	109

Figura 6.18. Parámetros añadidos al análisis dinámico en SolidWorks Motion. Fuente: Elaboración propia.	111
Figura 6.19. Exportación de cargas dinámicas al eje (Resultados de tensiones de Von-Mises). Fuente: Elaboración propia.	112
Figura 6.20. Porcentaje de daño en el eje del actuador. Fuente: Elaboración propia.	112
Figura 12.1. Resultados de tensión Von-Mises en el eje del actuador. Fuente: Elaboración propia.	147
Figura 12.2. Resultados de los desplazamientos en el eje del actuador. Fuente: Elaboración propia.	147
Figura 12.3. Resultados de las deformaciones unitarias en el eje del actuador. Fuente: Elaboración propia.	148
Figura 12.4. Resultados análisis de fatiga (Vida total). Fuente: Elaboración propia.....	148
Figura 12.5. Resultados análisis de fatiga (Porcentaje de daño). Fuente: Elaboración propia. ..	149

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Metodología por seguir para la elaboración del proyecto. Fuente: Elaboración propia.	28
Tabla 4.1. Características reométricas y propiedades del NOA 89H. Fuente: Norland Products Inc.	68
Tabla 4.2. Características reométricas y propiedades del NOA 13685. Fuente: Norland Products Inc.	68
Tabla 4.3. Parámetros técnicos y estructurales del Slot Die Coater. Fuente: Elaboración propia.	70
Tabla 5.1. Costos preliminares aproximados de cada una de las alternativas. Fuente: Elaboración propia.	75
Tabla 5.2. Matriz de decisión de alternativa preliminar. Fuente: Elaboración propia.	76
Tabla 5.3. Costos preliminares de cada una de las alternativas para la selección final. Fuente: Elaboración propia.	79
Tabla 5.4. Matriz de decisión de alternativa final. Fuente: Elaboración propia.	81
Tabla 5.5. Comparación del precio del cabezal (producto diseñado vs producto encontrado en el mercado). Fuente: Elaboración propia.	83
Tabla 6.1. Elementos que conforman al mecanismo del cabezal. Fuente: Elaboración propia. ...	86
Tabla 6.2. Resultados para el perfil de velocidad $V(x)$ de acuerdo a los datos evaluados. Fuente: Elaboración propia.	92
Tabla 6.3. Resultados para hd según la viscosidad. Fuente: Elaboración propia.	94
Tabla 6.4. Componentes para cada actuador (2 actuadores en total). Fuente: Elaboración propia.	94
Tabla 6.5. Dimensiones de la varilla roscada T12 posicionada en el eje. Fuente: Elaboración propia.	98
Tabla 6.6. Coeficientes de fricción en el eje. Fuente: Elaboración propia.	98
Tabla 6.7. Esfuerzos críticos de la varilla roscada. Fuente: Elaboración propia.	99
Tabla 6.8. Esfuerzo por Von Mises de la varilla roscada. Fuente: Elaboración propia.	100
Tabla 6.9. Propiedades mecánicas del eje de material AISI 304. Fuente: Elaboración propia. .	100
Tabla 6.10. Cálculos para el análisis a fatiga. Fuente: Elaboración propia.	101
Tabla 6.11. Cálculos para el análisis a fatiga. Fuente: Elaboración propia.	103
Tabla 6.12. Parámetros que ayudan a seleccionar a los motores. Fuente: Elaboración propia. .	104

Tabla 6.13. Datos calculados para seleccionar el rodamiento SKF 608-2RSH. Fuente: Elaboración propia.	110
Tabla 7.1. Plan de mantenimiento basado en confiabilidad para el dispositivo diseñado. Fuente: Elaboración propia.	114
Tabla 7.2. Acciones de mantenimiento preventivo para el dispositivo diseñado, de acuerdo a las posibles fallas. Fuente: Elaboración propia.	116
Tabla 12.1. Hoja de datos del Slot Die Coater. Fuente: Elaboración propia.	127
Tabla 12.2. Costos preliminares aproximados del mecanismo (Alternativa 1). Fuente: Elaboración propia.	128
Tabla 12.3. Costos preliminares aproximados del mecanismo (Alternativa 2). Fuente: Elaboración propia.	128
Tabla 12.4. Costos preliminares aproximados del mecanismo (Alternativa 3). Fuente: Elaboración propia.	129
Tabla 12.5. Costos de la alternativa seleccionada (Alternativa 1.1). Fuente: Elaboración propia.	130
Tabla 12.6. Costos aproximados de la alternativa con micrómetros (Alternativa 1.2). Fuente: Elaboración propia.	131
Tabla 12.7. Costos aproximados de la alternativa con indicador y actuador de husillo de bolas (Alternativa 1.3). Fuente: Elaboración propia.	131
Tabla 12.8. Datos iniciales del diseño del cabezal. Fuente: Elaboración propia.	133

Lista de abreviaciones

CPD: Critico para diseño

FS: Factor de seguridad

H: Valor medio del espesor del separador

h: espesor de película húmeda

$h_u = h_d$: Distancia entre cuchillas y vidrio

I: distancia desde cuchillas hasta el vidrio

J_{total} : inercia total del motor NEMA 17

L: Avance de la rosca

$L_u = L_d$: Longitud de cuchillas

L_{10} : vida nominal básica del rodamiento

L_{10} : vida nominal SKF del rodamiento

NZEB: Edificio de consumo energético nulo

P: Carga soportada por el actuador

P_{atm} : Presión atmosférica

Q: Caudal de suministro del fluido

Q' : Caudal bidimensional del fluido

S_e : Resistencia a la fátiga

S_{ut} : Resistencia a la tracción (Ultimate tensile strength)

S_y : Resistencia a la fluencia (Yield strength)

T_c : Temperatura crítica del VO_2

T_d : Torque de descenso

T_{lum} : Transmitancia lumínica

T_u : Torque de elevación

U_w : Velocidad lineal

VO_2 : Óxido de vanadio IV, también, dióxido de vanadio

$V(x)$: perfil de velocidad dentro del Slot Die Coater

W : Símbolo del Tungsteno

W : Longitud de aplicación del recubrimiento

w : Espesor del separador

x : Valor horizontal donde se evaluará el perfil de velocidad en el cabezal

Letras griegas

η : Viscosidad dinámica

θ : Ángulo de cuchillas

μ : Coeficiente de fricción

ν : Viscosidad cinemática

ρ : Densidad de un fluido

σ : Esfuerzo axial

σ_e : Esfuerzo equivalente

τ : Esfuerzo cortante

ΔP : Cambio de presión dentro del cabezal

ΔT_{sol} : Modulación solar

$\frac{\Delta v}{\Delta y}$: Gradiente de velocidad

Resumen

El proyecto doctoral de la M.Sc. Natalia Murillo Quirós plantea la fabricación de ventanas con recubrimientos termocrómicos que sean altamente eficientes en términos energéticos. Los experimentos hechos hasta el momento indican buenos resultados en vidrios portaobjetos, por lo que es vital empezar a realizar pruebas en vidrios más grandes.

Es por esto que el presente proyecto tiene como objetivo el diseño mecánico de un dispositivo que aplique un recubrimiento uniforme sobre una superficie de vidrio de 20 cm × 20 cm. Para ello se hizo una investigación preliminar de los mecanismos ideales para la aplicación anteriormente descrita, luego, se elaboró una propuesta de diseño de acuerdo a los requerimientos del cliente y finalmente, se realizaron los cálculos y selecciones necesarias en el diseño.

Además, se logró hacer cada uno de los planos de los componentes del dispositivo, así como su validación por medio de la simulación en SolidWorks y por último, se documentaron las características estructurales, técnicas y económicas del diseño. De acuerdo a esto, es posible utilizar un recubrimiento con un rango de viscosidades de 0,015 Pas a 0,17 Pas. También, el dispositivo posee una velocidad lineal máxima de 0,025 m/s y cuenta con un separador cuyo espesor es de 15×10^{-5} m.

Por último, se determinó que es posible que el grosor de la película húmeda tome un valor máximo de 100 nm, esto según las dimensiones del cabezal del dispositivo y el elemento para modular la altura. Lo cual permite que la sustancia mantenga sus propiedades termocrómicas y por ende, se logren fabricar vidrios de 20 cm × 20 cm que cumplan con la función de una ventana termocrómica inteligente.

Palabras clave: Slot Die Coater, ventanas termocrómicas, VO₂ dopado con W, diseño mecánico, matriz ranurada.

Abstract

The doctoral project of M.Sc. Natalia Murillo Quirós proposes the fabrication of windows with thermochromic coatings that are highly energy efficient. The experiments done so far indicate good results in glass slides, so it is vital to start testing on larger glasses.

This is why the present project aims at the mechanical design of a device that applies a uniform coating on a glass surface of 20 cm × 20 cm. For this purpose, a preliminary investigation of the ideal mechanisms for the application described above was carried out, then, a design proposal was elaborated according to the customer's requirements and finally, the necessary calculations and selections were made in the design.

In addition, each of the drawings of the components of the device were made, as well as their validation through simulation in SolidWorks and finally, the structural, technical and economic characteristics of the design were documented. Accordingly, it is possible to use a coating with a viscosity range of 0.015 Pas to 0.17 Pas. Also, the device has a maximum linear velocity of 0.025 m/s and has a separator whose thickness is 15×10^{-5} m.

Finally, it was determined that it is possible for the thickness of the wet film to reach a maximum value of 100 nm, depending on the dimensions of the device head and the element to modulate the height. This allows the substance to maintain its thermochromic properties and therefore, it is possible to fabricate 20 cm × 20 cm glasses that fulfill the function of an intelligent thermochromic window.

Keywords: Slot Die Coater, thermochromic windows, W-doped, VO₂, mechanical design.

1. Introducción

En Costa Rica se lanzó el Plan Nacional de Descarbonización en el 2019, en este se indican las pautas para lograr emisiones netas cero para el año 2050 (Gobierno de Costa Rica, 2019). Dentro de los ejes de dicho documento se contempla el desarrollo de edificaciones con una alta eficiencia energética. El concepto de edificio de consumo energético nulo (NZEB, por sus siglas en inglés) está estrechamente relacionado con el cumplimiento de dicho eje. Los NZEB se caracterizan por el uso de distintas tecnologías que hacen posible que su consumo energético se vea contrarrestado con la energía renovable que los mismos producen.

Es así como las ventanas inteligentes toman un papel importante en dichas edificaciones. Existen diversos tipos, sin embargo, en este documento se hablará sobre las ventanas termocrómicas a base del recubrimiento con óxido de vanadio IV (VO_2) y dopadas con tungsteno (W). Sobre sus propiedades se indagará más adelante, por ahora, la relevancia de las mismas para el presente proyecto prevalece en su proceso de fabricación.

En la actualidad es difícil llevar a cabo su aplicación comercial, esto específicamente en la región del trópico, ya que no se ha indagado lo suficiente sobre la manera de manufacturarlas a gran escala. Es por ello, por medio del trabajo doctoral de la M.Sc. Natalia Murillo Quirós, que surge la necesidad de diseñar un dispositivo que permita la fabricación de las ventanas inteligentes de forma comercial. En tal diseño se pretende abarcar diferentes parámetros de calidad requeridos para el buen funcionamiento de las mismas.

La ejecución del presente proyecto será posible por medio del uso de software CAD, donde se diseñará un dispositivo capaz de recubrir de manera uniforme ventanas de al menos 20 cm \times 20 cm. Por último, se brindarán los cálculos que avalen el diseño, planos, simulación y demás requerimientos del proyecto, para lograr de manera exitosa los objetivos propuestos.

2. Generalidades

2.1. Reseña de la empresa

2.1.1. Instituto Tecnológico de Costa Rica

El Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) es una institución autónoma encargada de la educación superior universitaria. Además de este fin, tiene otras funciones importantes como las de sus extensiones dedicadas a la investigación e innovación en pro del desarrollo del país.

El ITCR fue creado en el año 1971, bajo la presidencia de José Figueres Ferrer. Fue en ese mismo año que se firmó la Ley de Creación del ITCR, donde se tomó como institución modelo al Tecnológico de Monterrey. Las primeras instalaciones de la institución estuvieron ubicadas en el edificio Pirie, luego se hizo la compra del terreno donde se ubica el ITCR en la actualidad.

Las primeras carreras fueron: Ingeniería en Construcción, Ingeniería en Mantenimiento Industrial e Ingeniería en Producción Industrial. En un principio, los estudiantes obtenían el grado de ingenieros técnicos. Al llegar el año 1982, la institución contaba con 16 carreras y 24 edificios. A continuación se presenta la misión y la visión del ITCR, las cuales forman parte de la razón de ser de la universidad y el motivo por el cual se busca un constante crecimiento en la misma.

Misión:

Contribuir al desarrollo integral del país, mediante formación del recurso humano, la investigación y la extensión; manteniendo el liderazgo científico, tecnológico y técnico, la excelencia académica y el estricto apego a las normas éticas, humanísticas y ambientales, desde una perspectiva universitaria estatal de calidad y competitividad a nivel nacional e internacional. (Instituto Tecnológico de Costa Rica, n.d.)

Visión:

El Instituto Tecnológico de Costa Rica seguirá contribuyendo mediante la sólida formación del talento humano, el desarrollo de la investigación, la extensión, la acción social y la innovación científico-tecnológica pertinente, la iniciativa emprendedora y la estrecha vinculación con los diferentes actores sociales a la edificación de una sociedad más solidaria e inclusiva; comprometida con la búsqueda de la justicia social, el respeto de los derechos humanos y del ambiente. (Instituto Tecnológico de Costa Rica, n.d.)

2.1.2. Vicerrectoría de investigación y extensión del ITCR

La Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del ITCR es la encargada de facilitar y establecer las condiciones necesarias para que los docentes y los estudiantes sean capaces de generar, comprobar y aplicar sus conocimientos científicos. De esta manera se da la posibilidad de ejecutar proyectos que impulsan el desarrollo del país, tanto en el ámbito tecnológico como en el económico y social, contemplando el concepto de desarrollo sostenible.

Misión:

Promover y facilitar la investigación y la extensión científica y tecnológica, que permita el fortalecimiento académico de la institución y su vinculación permanente con el sector productivo y la comunidad nacional e internacional, para contribuir con el desarrollo integral del país. (Instituto Tecnológico de Costa Rica, n.d.)

Visión:

La VIE será una entidad líder en el ámbito institucional, nacional e internacional en la gestión de la investigación y extensión de excelencia en sus diferentes modalidades. (Instituto Tecnológico de Costa Rica, n.d.)

2.2. Planteamiento del problema

Según lo investigado, la eficiencia de las ventanas termocrómicas (o ventanas inteligentes) depende de las características de la región donde se utilizan, así como de las características del recubrimiento de las mismas. Sin embargo, en términos generales, este tipo de ventanas pueden lograr hasta un 46,43% más de ahorro en el consumo energético de un edificio en comparación con otras tecnologías como las ventanas de doble acristalamiento sin recubrimiento. (Aburas et al., 2021)

Por otro lado, existen cerca de 7 empresas alrededor del mundo que ofrecen ventanas inteligentes conformadas por materiales termocrómicos, estas se encuentran en América del Norte y Europa. (Tällberg et al., 2019)

Actualmente no existe una ventana inteligente diseñada para las necesidades de la región del trópico, por lo que se desarrolla un proyecto de doctorado para este fin. Por medio de este trabajo de graduación, se pretende establecer un diseño mecánico de un dispositivo que aplica el recubrimiento a la superficie del vidrio, cuyas dimensiones son de al menos 20 cm × 20 cm. Particularmente, la sustancia con la que se debe trabajar está hecha a base de VO₂ y se encuentra dopada con W.

Así se podrán fabricar y comercializar las ventanas termocrómicas inteligentes, siendo este un hecho innovador para la región. Esto se traduce en un importante avance tecnológico en materia ambiental y en la disminución de la factura eléctrica de los edificios. Es decir, el consumo energético de las edificaciones puede reducirse de forma significativa al tener la posibilidad de implementar las ventanas termocrómicas a su estructura. (Aburas et al., 2021)

Por otro lado, el diseño de un dispositivo de este tipo, permitirá marcar un precedente en la estandarización de los vidrios termocrómicos, así como la escalabilidad del proceso hacia

términos industriales. Esto ya que los vidrios que se han realizado hasta el momento se obtienen de forma manual, en tamaños de vidrios portaobjetos. Lo anterior, representa un problema ya que no existe forma adecuada de controlar el espesor de la película de recubrimiento, por lo que tampoco se puede garantizar el correcto funcionamiento de la ventana.

Es decir, actualmente no existe una apropiada estandarización del proceso. Además, el dispositivo aquí planteado (el cual posee un uso a nivel experimental en primera instancia y no industrial) debe ser usado por alrededor de 16 horas a la semana. Por lo que el mismo deberá ser diseñado para garantizar dicho tiempo de uso.

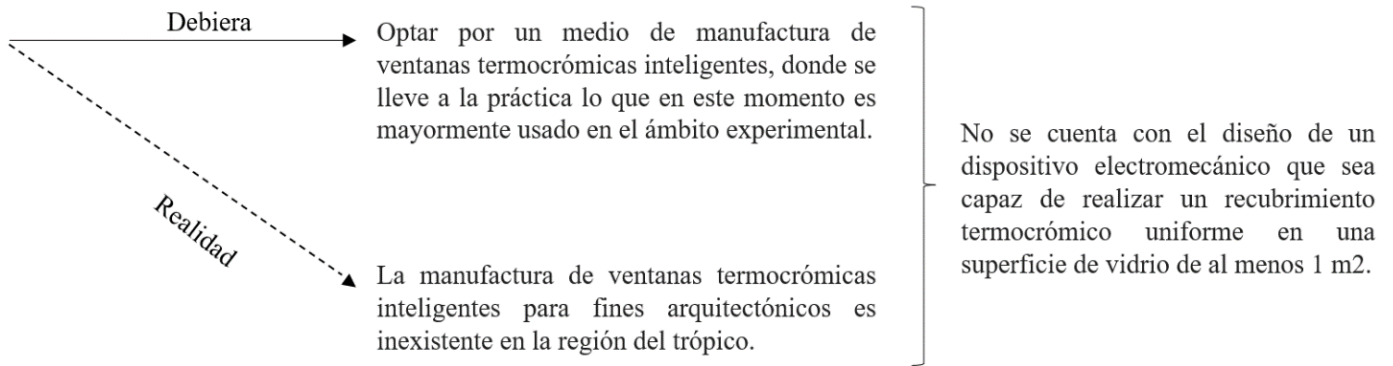


Figura 2.1. Desviación del problema planteado. Fuente: Elaboración propia.

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo General

Diseñar un dispositivo para la aplicación de un recubrimiento en una superficie de vidrio de al menos 20 cm × 20 cm, destinado para la fabricación de ventanas termocrómicas inteligentes a base de vanadio y matrices poliméricas con cristales líquidos colestéricos.

2.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características reométricas del recubrimiento que influyen en el proceso de diseño del dispositivo, así como los parámetros técnicos y estructurales que garanticen el correcto funcionamiento del mismo.
- Proponer un diseño mecánico para la adecuada aplicación del recubrimiento sobre la superficie de vidrio.
- Validar el diseño mecánico del dispositivo por medio del uso de métodos computacionales.
- Documentar las características estructurales, técnicas y económicas obtenidas y seleccionadas en el diseño mecánico del dispositivo.

2.4. Justificación

En el 2019, cerca del 40% de las emisiones de carbono a nivel mundial se atribuyeron a las construcciones y edificios, estas cifras no han cambiado en los últimos años. (Cielo & Subiantoro, 2021). En Costa Rica, de acuerdo al Plan Nacional de Descarbonización 2019 y el VII Plan Nacional de Energía 2015-2030, bajo el decreto N° 39219-MINAE, el país debe cumplir con diferentes ejes en pro de la sostenibilidad y disminución de las emisiones de CO₂. (Gobierno de Costa Rica, 2019; Sistema Costarricense de Información Jurídica, 2015)

Es por ello por lo que surge la necesidad de establecer nuevas formas de disminuir la huella de carbono de las edificaciones. Una de las soluciones ante lo planteado anteriormente es la implementación de edificios NZEB (edificio de consumo energético nulo), como ya se ha mencionado, ya que estas construcciones pueden obtener una eficiencia energética mucho mayor en comparación con el resto de las obras. (Cielo & Subiantoro, 2021)

Las ventanas termocrómicas presentan una gran ventaja en el área de ahorro energético, esta radica en su versatilidad para reducir o aumentar la transmitancia en el espectro visible e infrarrojo dependiendo de la cantidad de radiación solar. Es decir, si esta última es alta, la ventana minimiza su transmitancia en el espectro infrarrojo manteniendo prácticamente inalterado el visible, lo cual hace que el confort térmico en el edificio se controle de forma natural y sin consumir energía demás (ya sea por sistemas HVAC o por iluminación artificial). (Ochoterena & Försth, 2018, p.873-876)

Esta tecnología no ha tenido éxito en cuanto a su comercialización, al menos en la región del trópico. La mayoría de las técnicas de recubrimiento que existen son destinadas a la producción a baja escala, donde su uso es principalmente experimental y no con fines arquitectónicos. Además, las únicas empresas que comercializan ventanas a base de materiales

termocrómicos se encuentran en Estados Unidos, Reino Unido, Irlanda, Alemania y Canadá. (Tällberg et al., 2019). Por consiguiente, la importancia de dar una solución a la problemática planteada en este proyecto radica en el impacto que se puede generar a nivel económico y ambiental, así como la innovación que representa para la región.

Las ventanas termocrómicas se caracterizan por una excelente climatización de los recintos, costo bajo en materiales de fabricación y en mantenimiento (esto al compararlas con otros tipos de ventanas inteligentes) y una muy buena adaptación ante los cambios de temperatura. (Outón Porras, 2020).

Al diseñar un dispositivo que permite la obtención de ventanas termocrómicas inteligentes mediante el recubrimiento de una superficie de vidrio de al menos 20 cm × 20 cm se hace viable la utilización de este tipo de ventanas para aplicaciones de diseño arquitectónico. La posterior construcción del diseño propuesto en este documento y la acción misma de lograr un diseño óptimo, marca un precedente en el desarrollo sostenible de los espacios urbanos.

Bajo la aplicación de conceptos de resistencia en materiales, mecánica de fluidos y diseño mecánico, se obtuvo una propuesta de diseño del dispositivo. Este presenta particularidades que determinan la calidad del producto final, por ende, sus componentes y funcionamiento deben estudiarse a detalle. Esto con el fin de conseguir un recubrimiento uniforme, donde sus características reométricas no se vean alteradas asegurando así la correcta aplicación de la sustancia recubridora y la eficacia de la ventana.

Las ventajas comparativas de las ventanas termocrómicas deben resguardarse por medio de la correcta planeación y ejecución del presente proyecto. Además, al llevarse a cabo el proyecto propuesto se tendría un valor agregado, ya que su ejecución posee una relación estrecha con la innovadora investigación doctoral mencionada en otros apartados.

2.5. Viabilidad

Al ser un proyecto que es parte de una investigación llevada a cabo en el ITCR y en conjunto con la Universidad de Costa Rica, se cuenta con un presupuesto asignado por parte de la VIE y por donaciones de esta última institución universitaria. Pese a que tal presupuesto es limitado, este se encuentra contemplado hasta finalizar el año 2022 para lograr la gestión de la investigación doctoral y sus derivaciones, en este caso la presente propuesta para el trabajo final de graduación (TFG).

Por lo ya descrito, es posible contar con las instalaciones y parte de los recursos de los laboratorios de química de ambas universidades. También, se cuenta con la posibilidad de hacer uso de los laboratorios de la escuela de Ingeniería Electromecánica del ITCR, planificando su uso con el debido tiempo.

Aunque el presente proyecto solamente contempla el diseño mecánico del dispositivo, es importante destacar que en una eventual construcción del mismo, es probable la utilización de las instalaciones de la escuela de Ingeniería Electromecánica para su manufactura.

Por otro lado, la elaboración de planos y simulaciones se realizarán por medio del uso de las licencias otorgadas por el ITCR para la obtención de software CAD. En caso de requerir otras herramientas, la primera opción será el uso de programas de acceso gratuito.

Ante la situación de pandemia del SARS-CoV-2, el uso de las instalaciones ya mencionadas se gestionará con antelación y bajo las medidas sanitarias emitidas por el Ministerio de Salud Pública de Costa Rica.

2.6. Alcance

Por la naturaleza de la presente propuesta de TFG, es necesario recalcar su papel dentro de la investigación doctoral de la investigadora y profesora Natalia Murillo. La puesta en marcha de este proyecto posee una relación directa con la aplicación de los conocimientos adquiridos en dicha investigación. Asimismo representa una solución para el desarrollo de espacios urbanos con obras NZEB, ya que permite hacer realidad la manufactura de ventanas termocrómicas inteligentes en la región del trópico.

Lo anterior se logró a través de la implementación de herramientas de diseño como lo es la simulación del mecanismo, donde el método computacional conocido como método de los elementos finitos (MEF) determina el comportamiento del mecanismo mediante el uso de software CAD. Además, antes de tal simulación se hizo el análisis estructural del dispositivo y un estudio detallado de la sustancia a utilizar para el recubrimiento.

Finalmente, el proyecto se limita al área de diseño. Esto quiere decir que la etapa constructiva del dispositivo se plantea para un futuro cercano pero no en el cronograma propuesto para el TFG. Cabe destacar que dicha etapa se ve facilitada al contar con los resultados de los objetivos planteados en el presente documento.

2.7. Limitaciones

Algunas de las limitaciones a las que el proyecto se enfrentó son las siguientes:

- Aforo limitado en diversos recintos de la universidad. Esto complica la gestión del tiempo y espacio para la realización de laboratorios y pruebas relacionadas al proceso de diseño.
- Aunque ya se mencionó que existe un presupuesto destinado a la ejecución del proyecto, este debe racionarse entre las actividades por cumplir dentro de los objetivos propuestos. Por lo que se previno la solicitud de presupuesto extra, es decir, se debió contemplar la búsqueda de otras fuentes de financiamiento.
- En caso de la ausencia de la M.Sc. Natalia Murillo Quirós por motivos de salud u otros, se planteó establecer otro medio de capacitación técnica y asesoría sobre los aspectos relacionados a la investigación doctoral.
- Si bien habían posibilidades de hacer uso de diversas instalaciones del ITCR y de la UCR, estas debieron solicitarse con anterioridad, así como para el uso de distintos instrumentos y materiales. Por lo que este punto quedó a disposición del cronograma y planificación de parte de las instituciones universitarias.

2.8. Metodología

Tabla 2.1. Metodología por seguir para la elaboración del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Objetivo específico	Actividades por realizar	Fuente de información	Equipo
<p>Determinar las características reométricas del recubrimiento que influyen en el proceso de diseño del dispositivo, así como los parámetros técnicos y estructurales que garanticen el correcto funcionamiento del mismo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Realizar el estado del arte sobre el recubrimiento termocrómico. - Ejecutar pruebas en el laboratorio. - Delimitar las características reométricas que intervienen en el diseño, así como sus respectivos valores y particularidades. - Indicar la reactividad y estabilidad del recubrimiento en su entorno. - Establecer los parámetros técnicos y estructurales necesarios en la ejecución del diseño. 	<ul style="list-style-type: none"> - Revisión de artículos científicos, repositorios y libros. - Asesoría con la M.Sc. Natalia Murillo Quirós. - Prácticas en los laboratorios de la Escuela de Química del ITCR. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bases de datos del ITCR. - Materiales destinados a la investigación doctoral de la M.Sc. Natalia Murillo Quirós. - Microsoft Excel.
<p>Proponer un diseño mecánico para la adecuada aplicación del recubrimiento sobre la superficie de vidrio.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Plantear tres propuestas distintas del diseño mecánico. - Comparar las tres propuestas mediante una matriz de decisión técnico- financiera. - Hacer cotizaciones en el mercado para generar un criterio de decisión en cada una de las propuestas. - Memoria de cálculo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Información y páginas web de distintos proveedores. 	<ul style="list-style-type: none"> - Microsoft Excel.

(Continuación)

Validar el diseño mecánico del dispositivo por medio del uso de métodos computacionales.	<ul style="list-style-type: none">- Realizar archivos CAD de la propuesta seleccionada.- Simular en software CAD.- Evaluar posibles mejoras, esto de forma simultánea a la realización de los archivos CAD, es decir, en un proceso iterativo.- Plantear ruta crítica sobre el control de las características reométricas.	- Documentación de software CAD.	<ul style="list-style-type: none">- Microsoft Excel.- Software CAD (SolidWorks).
Documentar las características estructurales, técnicas y económicas obtenidas y seleccionadas en el diseño mecánico del dispositivo.	<ul style="list-style-type: none">- Elaboración de planos en software CAD.- Realizar informe sobre las especificaciones estructurales, técnicas y económicas del dispositivo.	- Documentación de software CAD.	<ul style="list-style-type: none">- Software CAD (SolidWorks).

2.9.Cronograma

Actividad	Descripción	Semana																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	Estado del arte																	
2	Pruebas en laboratorio																	
3	Delimitar las características reométricas																	
4	Indicar la reactividad y estabilidad del recubrimiento en su entorno.																	
5	Establecer los parámetros técnicos y estructurales																	
6	Elaborar las propuestas de diseño																	
7	Hacer cotizaciones																	
8	Comparar con matriz de decisión técnico-financiera																	
9	Realizar archivos CAD de la propuesta seleccionada																	
10	Simular en software CAD																	
11	Evaluar posibles mejoras																	
12	Plantear ruta crítica sobre el control de las características reométricas																	
13	Elaborar los planos																	
14	Revisar los planos																	
15	Memoria de cálculo																	
16	Realizar informe sobre especificaciones técnicas																	
17	Redactar el informe final del proyecto																	
18	Entregar borrador a lectores																	
19	Realizar la presentación																	
20	Revisar observaciones																	
21	Entregar resumen ejecutivo																	
22	Revisar con el filólogo																	
23	Entregar al coordinador de la carrera																	
24	Presentación del proyecto																	

Figura 2.2. Cronograma proyectado para la realización del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

3. Marco Teórico

3.1. Edificios de consumo energético nulo (NZEB)

Un edificio de consumo energético nulo (NZEB por sus siglas en inglés) es aquella construcción que posee un rendimiento energético sumamente alto. Para cumplir con dicha definición es necesario que los recursos energéticos que se consumen se obtengan de fuentes renovables. Debido a que las emisiones de dióxido de carbono son particularmente altas en el campo de la construcción, los NZEB son de gran importancia. La Unión Europea, por ejemplo, exige planes nacionales que incluyan la implementación de los NZEB. En este tipo de edificios se utilizan tecnologías que permiten la generación de energía renovable y el ahorro de la misma, haciendo que sus diseños sean amigables con el medio ambiente. (Cielo & Subiantoro, 2021)

Un aspecto clave en la correcta implementación de los edificios NZEB es la reducción de los recursos energéticos destinados a la climatización del lugar. Es decir, mediante diversas tecnologías es posible minimizar el impacto negativo que causan sistemas como los de HVAC. Añadido a esto, según Khaled & Berardi (2021), el 36% y el 7% de la energía consumida por edificios corresponde a la calefacción y la iluminación de espacios, respectivamente, además la pérdida anual de energía a través de las ventanas convencionales representa entre un 5% y 10% del consumo total de energía. (p.2)

Gracias a la evolución de la tecnología en materiales es posible crear ventanas inteligentes que ayuden a mejorar la eficiencia energética de un edificio, es así como estas no solo cumplen con su fin arquitectónico sino que también ayudan a reducir el consumo energético. Tales ventanas son idóneas para su aplicación en los edificios NZEB, ya que debido a sus características estas poseen un funcionamiento sencillo y en algunos casos autónomo en términos de accionamiento. (Memon et al., 2020)

3.2. Ventanas termocrómicas inteligentes

Una ventana inteligente se encarga de asegurar el confort térmico mediante el uso de distintas tecnologías, esto por medio de la modulación de la entrada de luz que a su vez genera un ahorro de los recursos energéticos. Existen diversos tipos de ventanas inteligentes, donde sus principales métodos de funcionamiento se basan en la aplicación de recubrimientos. Estos últimos pueden ser de tipo estático o dinámico, dentro de las ventanas que usan los recubrimientos dinámicos se encuentran las termocrómicas.

A su vez, este tipo de recubrimiento posee dos categorías: dinámico pasivo y dinámico activo. Los recubrimientos dinámicos pasivos poseen grandes ventajas ya que sus instalaciones son más sencillas. Estas no cuentan con cableado ni fuente de alimentación, por ende, sus costos de manufactura y mantenimiento son más bajos en relación con las ventanas dinámicas activas. Las ventanas termocrómicas estudiadas en el presente documento entran en la categoría que utiliza recubrimiento dinámico pasivo. (Khaled & Berardi, 2021)

Una sustancia termocrómica es aquella que permite el cambio de sus propiedades ópticas de acuerdo a los cambios de temperatura presentes en el exterior. Tales propiedades se encuentran estrechamente relacionadas a la transmitancia lumínica (T_{lum}) y modulación solar (ΔT_{sol}). Estos conceptos son importantes a la hora de realizar el recubrimiento de la ventana, ya que el espesor del mismo determina la transmitancia del producto final. (Aburas et al., 2021)

La sustancia predilecta a la hora de realizar el recubrimiento en la ventana inteligente es el dióxido de vanadio (conocido también como óxido de vanadio IV), ya que este presenta características morfológicas aptas para obtener las propiedades ópticas requeridas a la hora de la fabricación de la ventana termocrómica.



Figura 3.1. Vidrios portaobjetos recubiertos con sustancia a base de VO₂ (concentraciones desde 0% hasta 10%), resultado de pruebas en laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, para un mayor entendimiento del funcionamiento y las características de este tipo de ventanas, es importante tener presente la estructura química de los materiales que conforman a la misma. Esto a su vez es relevante para determinar el comportamiento del fluido que recubre la ventana y de esta manera obtener las características reométricas que influyen en el diseño mecánico del dispositivo que realiza el recubrimiento en la ventana.

A continuación se brindará una breve descripción de los conceptos involucrados en lo ya mencionado, por medio de estos se podrá comprender el valioso papel de las características del recubrimiento en la obtención de un diseño mecánico óptimo a desarrollar en el presente proyecto.

3.2.1. Matrices poliméricas

El avance de la ciencia en materiales ha logrado generar un sinnúmero de posibilidades para el desarrollo ingenieril en varios campos de estudio. Un significativo avance en esta materia fue el hecho de lograr sintetizar polímeros, los cuales se definen como cadenas de monómeros que poseen una gran diversidad de propiedades. Mediante la creación de diversas matrices

poliméricas se ha progresado en diferentes industrias, las cuales van desde el área textil hasta la industria manufacturera y de construcción.

Específicamente en la creación de ventanas inteligentes, las matrices poliméricas cumplen un papel crucial ya que permiten modificar las características del producto para garantizar el bienestar del usuario. Gracias a la integración de matrices poliméricas se aprovechan en gran medida los beneficios que brindan las mismas sin dejar de lado las ventajas que poseen los cristales líquidos colestéricos. De estos últimos se hablará más adelante, por ahora lo que se debe tomar en cuenta es que estos en la composición de la ventana se encuentran incrustados dentro de la matriz polimérica.

A la hora de efectuar esta técnica, las propiedades como el índice de refracción, conductividad, constante dieléctrica y demás características mecánicas de la matriz polimérica se verán alteradas. De esta manera, es posible que las características ópticas del material con el que está hecha la ventana se vean modificadas para así poder obtener un aspecto agradable que permita el uso de las mismas para fines arquitectónicos. (Drzaic, 1995)

3.2.2. Cristales líquidos colestéricos

Los cristales líquidos se definen como sustancias que son capaces de demostrar características tanto de la fase líquida como la sólida. Estos tienen diferentes clasificaciones de acuerdo a la estructura que poseen, para esta ocasión se indagará únicamente en los del tipo colestérico (también llamado quiral).

La estructura de un cristal líquido colestérico se caracteriza por la formación de capas de moléculas, donde de una a la otra existe un ángulo de torsión determinado, tal estructura puede observarse en la figura 3.1. Esta particular distribución permite que existan fenómenos muy específicos en la sustancia, donde la principal particularidad es la sensibilidad ante cambios de

temperatura, dando lugar a aplicaciones de índole termográfico. Según Mitov, el patrón de hélice que se forma en este tipo de cristal hace posible que se dé una reflexión selectiva de la luz, lo cual es muy atractivo a la hora de fabricar ventanas inteligentes. (2020)

Lo anterior es posible ya que en los cristales líquidos colestéricos la longitud de onda reflectante está determinada por el índice de refracción promedio y el paso helicoidal. Cabe destacar que este último a su vez se encuentra definido por la torsión que existe en la estructura de esta sustancia. (Zhang et al., 2021)

De acuerdo a lo ya mencionado, al usar estos cristales para la obtención de ventanas termocrómicas inteligentes, es esencial contar con uniformidad y exactitud a la hora de realizar el recubrimiento, ya que de otra manera no se conservarían las propiedades ópticas tan favorables que se presentan en dichos materiales.

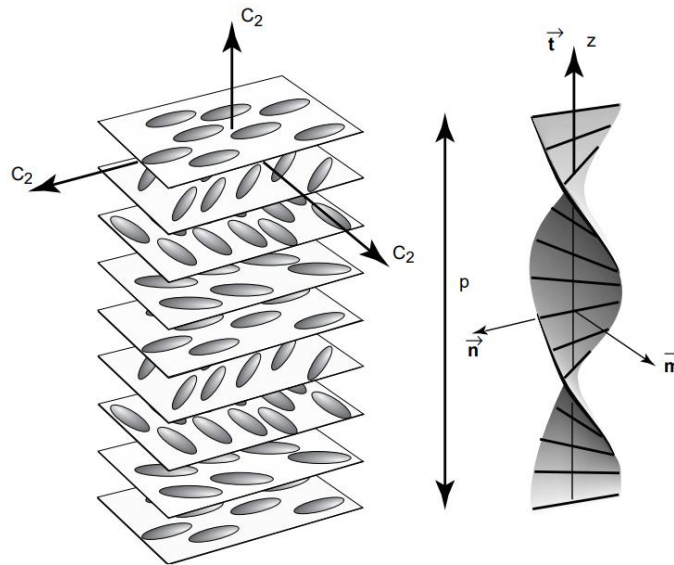


Figura 3.2. Estructura del cristal líquido colestérico. Fuente: (Oswald & Pieranski, 2005)

3.2.3. Recubrimiento a base de dióxido de vanadio (VO_2)

El dióxido de vanadio (VO_2) presenta transiciones semiconductor- metal que hacen posible la evidencia de las propiedades termocrómicas de esta sustancia. Estas transiciones se

generan al existir un cambio de temperatura, donde se alcanza la temperatura crítica (T_C) del VO_2 ($68\text{ }^\circ\text{C}$). Esto hace que las propiedades ópticas del mismo generen un ajuste en la coloración del vidrio, produciendo así una regulación natural de la transmitancia térmica. (Alfonso et al., 2019)

Este fenómeno se lleva a cabo en una de las fases del VO_2 , específicamente en la rutilo. Es aquí donde a altas temperaturas se refleja la radiación infrarroja y se transmite la misma pero a temperaturas que se encuentran por debajo de la zona de confort térmico. Esto se explica mediante las propiedades de dicha fase, donde el VO_2 presenta un estado semimetálico y al mismo tiempo reflectante, lo cual se puede observar en la figura 3.2. (Salamati et al., 2019)

Sin embargo, debido a que la ventana debe ser funcional a temperaturas inferiores que la T_C del VO_2 , se debe dopar al mismo. Esto se logra al utilizar tungsteno (W), el cual consigue que la T_C disminuya, ya que si se agrega el equivalente a un 1% de W, la temperatura de transición disminuye aproximadamente en $20\text{ }^\circ\text{C}$. Además, el hecho de dopar esta sustancia ayuda a incrementar la tasa de transmisión de la luz visible (es decir, T_{lum}) y a lograr una ΔT_{sol} idónea para su aplicación. (Warwick & Binions, 2014)

Es importante destacar que aunque el VO_2 es la sustancia predilecta para la fabricación de ventanas termocrómicas, los recubrimientos a base de la misma siguen en constante estudio. Lo anterior ya que como se ha evidenciado, es una tecnología relativamente nueva, que requiere de mejoras y donde las propiedades químicas presentes son de gran interés para la creación de ventanas termocrómicas que sean altamente eficientes. (Cui et al., 2018)

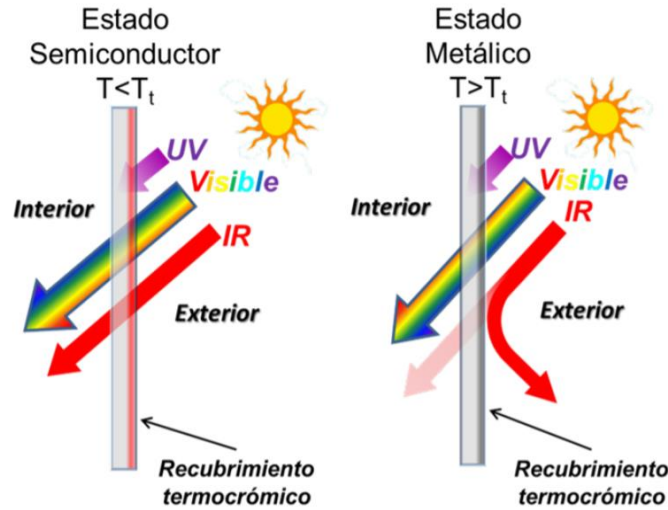


Figura 3.3. Funcionamiento de una ventana termocrómica. Fuente: (Alfonso, Agustín, & González-Elipe, 2019)

3.3. Propiedades ópticas, morfológicas y reométricas del recubrimiento a base de VO₂ que influyen en el diseño mecánico del dispositivo

Tomar en consideración las características físicas y químicas asociadas al recubrimiento es de gran importancia para lograr un buen diseño mecánico. Esto ya que el éxito de conseguir fabricar ventanas termocrómicas inteligentes está estrechamente relacionado con la capacidad del dispositivo para obtener un recubrimiento uniforme y que al interactuar con su entorno se mantengan las propiedades que lo hacen tan atractivo para el campo del ahorro energético. Es por ello que a continuación se describirán las características más importantes del recubrimiento que poseen relación con el proceso del diseño mecánico.

3.3.1. Tasa de transmisión de la luz visible (T_{lum})

También llamada en este documento como transmitancia lumínica. Este concepto ya se ha mencionado anteriormente, no obstante, es necesario ahondar más en el mismo. La T_{lum} representa un parámetro importante a la hora de verificar la correcta funcionalidad de una

ventana termocrómica inteligente. En general, se busca que la T_{lum} sea incrementada a través de diversos procesos químicos, como lo es el dopaje con W.

La T_{lum} indica el valor que un medio puede llegar a transmitir de luz visible, es decir, este parámetro relaciona el rango de luz visible (que va desde los 380 nm a 780 nm de longitud de onda) con la capacidad de un medio determinado para transmitir un valor específico de dicho rango. Añadido a esto, es importante puntualizar que existe evidencia donde se plantea que un valor aceptable de T_{lum} para poder optar por una ventana comercializable debe ser de más de un 40%. (Olavi, 2020)

Esta propiedad fotométrica se define matemáticamente como:

$$T_{lum} = \frac{\int T(\lambda)f_{lum}(\lambda)d\lambda}{\int f_{lum}(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$

Donde $T(\lambda)$ esta dada de acuerdo a la longitud de onda y $f_{lum}(\lambda)$ es la sensibilidad que posee el ojo humano en el espectro visible.

Se debe hacer hincapié en que este valor es dependiente de otras características del recubrimiento, tales como el su espesor, estructura y estequiometria, más adelante se mencionará las mismas.

3.3.2. Modulación solar (ΔT_{sol})

Al igual que el caso anterior, la ΔT_{sol} se relaciona con la calidad de la ventana termocrómica. Si este valor se encuentra por debajo del 10% (si el recubrimiento está hecho a base de VO_2), la ventana no puede emplearse en la aplicación destinada a la arquitectura. (Qu et al., 2019)

La ΔT_{sol} se define como el valor de energía solar que se logra transmitir a través de un medio determinado. Entre más se logre incrementar este valor, mayor capacidad de aislamiento solar tendrá la edificación que posea ventanas termocrómicas. (Outón Porras, 2020).

Se define como:

$$\Delta T_{sol} = \frac{\int T(\lambda) f_{sol}(\lambda) d\lambda}{\int f_{sol}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

Donde $T(\lambda)$ es la transmitancia de acuerdo a un determinado valor de onda y $f_{sol}(\lambda)$ es el valor asociado al espectro de irradiancia solar para una masa de aire con un valor específico.

Nuevamente, como se mencionó para la T_{lum} , la modulación solar dependerá de factores como el espesor y de la estequiometría del recubrimiento.

3.3.3. Espesor

Como ya se ha descrito en los incisos anteriores, el espesor es un parámetro importante para garantizar la mejora de las propiedades termocrómicas de la ventana. A la hora de realizar la manufactura de una ventana inteligente es importante considerar que la máquina que realice el recubrimiento debe ser capaz de generar una película con un espesor lo suficientemente delgado.

Según algunas investigaciones, el espesor tiene influencia directa en la T_{lum} y en la ΔT_{sol} . Por ejemplo, de acuerdo a Chen et al, al optimizar el espesor de la o las capas del recubrimiento termocrómico a base de VO_2 en el vidrio se puede llegar a obtener un valor de hasta 84.8% en la T_{lum} . Es importante destacar que en este experimento también se utilizaron otras técnicas para mejorar las propiedades termocrómicas (además de regular el espesor), empero, con las muestras estudiadas se puede asegurar que en las películas cuyo valor de espesor es menor la T_{lum} aumenta. (2011)

Se debe cuidar este aspecto, ya que si bien existen investigaciones que señalan los beneficios de disminuir el espesor, estas también advierten que al hacer esto la ΔT_{sol} puede

llegarse a reducir de manera significativa. Es por ello que se deben limitar los valores de espesor a un rango donde se cumpla con las especificaciones arquitectónicas. Asimismo, en ciertos artículos se puede observar que los espesores que se encuentran entre 80 nm y 40 nm consiguen un buen balance entre la T_{lum} y ΔT_{sol} . (Qu et al., 2019)

Lograr un espesor ideal depende en gran medida de la técnica utilizada para realizar el recubrimiento. A nivel experimental, utilizando láminas de vidrio portaobjetos, se opta por usar artefactos que sumerjan completamente la muestra (*dip coating*) o por aquellos que distribuyen el recubrimiento sobre una de las caras del vidrio por medio de la rotación del mismo (*spin coating*).

Sin embargo, a nivel industrial es necesario pensar en la utilización de artefactos que logren un espesor uniforme sobre un vidrio que posea dimensiones aplicables a la arquitectura. Es por ello que por medio de los objetivos del proyecto, se plantea el análisis de diferentes técnicas de recubrimiento para así determinar el diseño mecánico idóneo del dispositivo. Más adelante se mencionarán las alternativas propuestas y los criterios de selección empleados a la hora de elegir la técnica más conveniente para el diseño del dispositivo.

Por otro lado, es importante insistir en la importancia de contemplar no solamente el espesor, sino que también se deben tomar en cuenta las demás características morfológicas y reométricas del recubrimiento para generar buenos resultados.

3.3.4. Estequiometría en los elementos que conforman al recubrimiento.

En esta ocasión no se ahondará tanto como se ha hecho en otros temas, ya que la estequiometría del recubrimiento es un campo que se encuentra fuera del alcance del presente proyecto. No obstante, es importante que se entienda la influencia que esta tiene para asegurar

las propiedades termocrómicas de la ventana y que la misma sea funcional en el campo de la arquitectura.

Según Liu et al, a la hora de sintetizar el recubrimiento se debe controlar la proporción que existe entre el oxígeno y el vanadio, esto con el fin de evitar la alteración de las propiedades físicas de la sustancia, así como de la T_C de la misma. Por ejemplo, si existe una deficiencia de oxígeno la fase aislante del VO_2 tiende a ser más conductora. Por otro lado, al disminuir la cantidad de oxígeno, la T_C del VO_2 también tiende a disminuir. (2018)

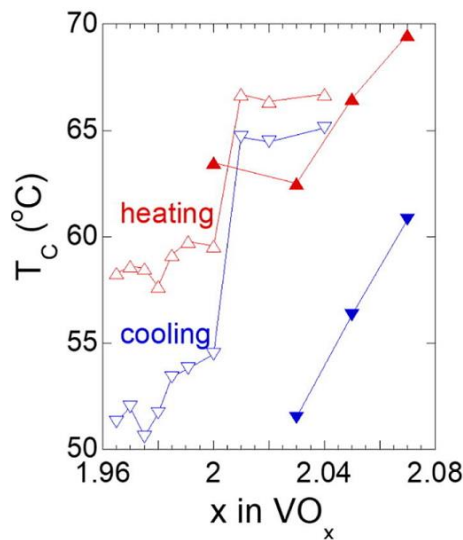


Figura 3.4. Efecto de la no estequiometría (eje x) en la T_C (eje y). Fuente: (Liu et al., 2018)

3.3.5. Curado UV

Pese a que este apartado no es propiamente una característica del recubrimiento, este sí influye en la eficiencia del mismo. El curado por medio de luz UV forma parte del proceso de obtención de las ventanas inteligentes, por lo que este aspecto representa un punto importante a considerar en el presente proyecto. Cabe destacar que el curado se realiza una vez se ha terminado de aplicar la película de recubrimiento por todo el vidrio y al haber eliminado las posibles burbujas de la misma.

En secciones posteriores a esta se hará una explicación detallada del proceso de fabricación de las ventanas, por ahora se debe tomar en cuenta que el curado UV influye en la tasa de polimerización.

Lo anterior ya que según Devadiga & Ahipa, el tiempo y temperatura de curado UV es determinante en la estructura de la red polimérica. Llevar a cabo una irradiación UV provoca que en la matriz de cristal líquido colestérico se genere la morfología deseada para la debida aplicación termocrómica, donde esta irradiación incide en la relación de contraste del recubrimiento. (2022)

3.3.6. Viscosidad

Esta propiedad reométrica posee gran importancia para el presente proyecto. Esto es debido a la influencia que la misma tiene a la hora de realizar el recubrimiento a base de VO₂. De acuerdo a distintas investigaciones, independientemente de la técnica que se utilice para hacer el recubrimiento, la viscosidad juega un papel importante en el espesor resultante de la película termocrómica, así como en la correcta ejecución de la técnica seleccionada.

Es importante tener presente la definición de viscosidad. Según la literatura existe la viscosidad dinámica y la viscosidad cinemática. La primera hace referencia a aquella resistencia que posee la sustancia a la hora de fluir. En este caso existe una relación entre dicha viscosidad, el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad del fluido. La fórmula de la viscosidad dinámica se define entonces como:

$$\eta = \tau \frac{\Delta y}{\Delta v} \quad (3)$$

En la expresión anterior η es la viscosidad dinámica, τ es el esfuerzo cortante (aquel que se genera al darse el deslizamiento de una capa sobre otra del fluido) y $\frac{\Delta y}{\Delta v}$ es el inverso del gradiente de velocidad del fluido (medida del cambio de velocidad cuando la sustancia fluye). Es

importante destacar que la viscosidad dinámica también se conoce como viscosidad absoluta. (Mott, 2015)

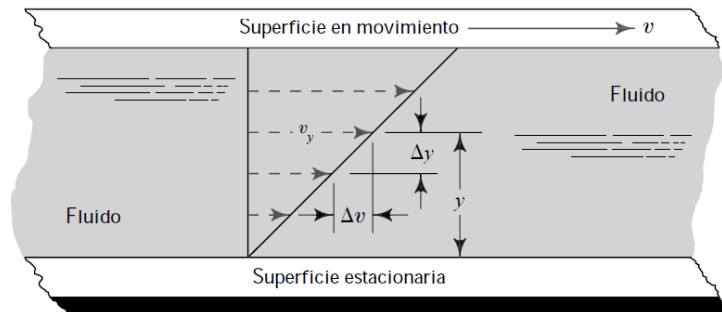


Figura 3.5. Comportamiento de la velocidad en un fluido newtoniano en movimiento. Fuente: (Mott, 2015)

La viscosidad cinemática (ν) relaciona a la viscosidad dinámica con la densidad de la sustancia (ρ). Esta también se define como una propiedad intrínseca de cada fluido y describe como la oposición de la sustancia que fluye posee relación con la fuerza de gravedad. La viscosidad cinemática se define como:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4)$$

El comportamiento de la viscosidad de una sustancia indica si esta es un fluido newtoniano o uno no newtoniano. Según Mott, un fluido newtoniano exhibe un comportamiento donde “La viscosidad η sólo es una función de la condición del fluido, en particular de su temperatura. La magnitud del gradiente de velocidad $\frac{\Delta v}{\Delta y}$ no tiene ningún efecto en la magnitud de η ”. (2015)

Por otro lado, en un fluido no newtoniano la viscosidad depende de factores como el gradiente de velocidad, la temperatura y/o el esfuerzo cortante. Este hecho hace que el análisis de dichas sustancias posea la particularidad de no contar con una viscosidad constante. En la figura

3.5 se puede visualizar la relación que existe entre $\frac{\Delta v}{\Delta y}$, τ y η para cada tipo de fluido, donde los fluidos llamados Bingham, seudoplástico y dilatante corresponden a fluidos no newtonianos.

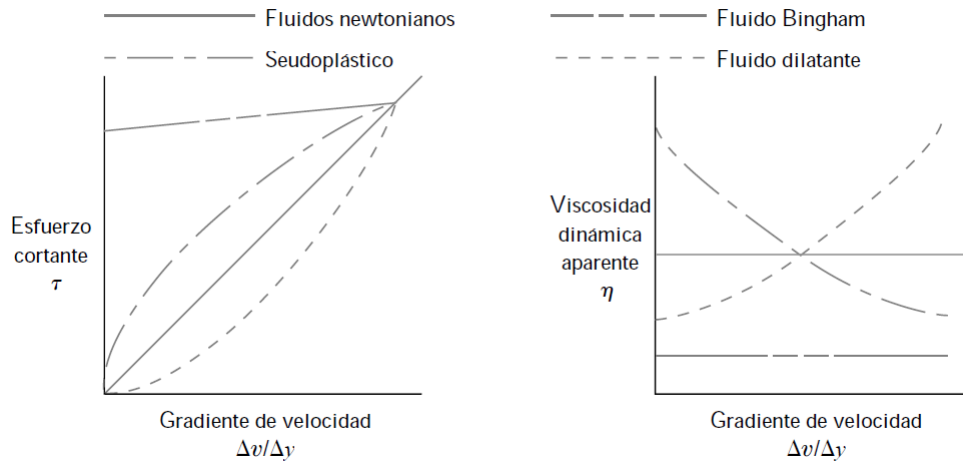


Figura 3.6. Comportamiento de fluidos newtonianos y no newtonianos. Fuente: (Mott, 2015)

Por lo que resta del documento se documentará el comportamiento y los valores de viscosidad considerados para los cálculos del diseño del dispositivo. Además, en los incisos posteriores se retomará la relación del gradiente de velocidad $\frac{\Delta v}{\Delta y}$, caudal y viscosidad, para garantizar la funcionalidad de la máquina.

3.4. Conceptos relacionados al diseño de la matriz ranurada (Slot Die Coater)

En secciones posteriores se justificará la selección de la técnica de recubrimiento utilizada para el diseño del dispositivo. Por ahora es importante considerar aquellos principios que están vinculados con la misma. En este punto se brindarán las ecuaciones que se requieren para definir la geometría de una matriz ranurada. Esta última consiste en un elemento prismático que cumple con la función de distribuir un fluido sobre la superficie de un sustrato, logrando un recubrimiento uniforme y espesores con valores muy pequeños. Esta técnica es muy versátil, ya que es utilizada tanto en procesos industriales como en aplicaciones de laboratorios. Por lo

general, los parámetros que intervienen en el diseño de la matriz tienen que ver con las características reométricas del recubrimiento, lo cual se evidenciará en los siguientes incisos.

3.4.1. Componentes del cabezal ranurado

Los cabezales o matrices ranuradas se utilizan en la técnica denominada “*slot die coating*”. En la misma el objetivo principal es brindar un recubrimiento uniforme y de un muy bajo espesor a través del uso de este elemento. Esta técnica puede ser utilizada por medio de sistemas rollo a rollo (en inglés: “*roll to roll*”), donde se usan sustratos flexibles. También existen los sistemas hoja a hoja (en inglés: “*sheet to sheet*”), tal y como se muestra en la figura 3.6, en este caso los sustratos son sólidos. Este último sistema es de especial interés para el presente proyecto, sin embargo, es importante destacar que los aspectos involucrados en la determinación de la geometría de la matriz son los mismos para ambos casos.



Figura 3.7. Ejemplo de un Slot Die Coater. Fuente: Ossila.com

Todo cabezal ranurado presenta una lista de componentes básicos que hacen posible su correcto funcionamiento. En la figura 3.7 se puede observar la estructura básica de un cabezal de

este tipo. Es esencial que este cuente con dos placas que se encuentren unidas por medio de un separador o calza. Este último elemento hace posible generar el espacio necesario entre ambas placas, para así poder modular el espesor de la película y dejar pasar a la misma.

Las placas poseen geometrías donde se incluyen cavidades que permiten la regulación del volumen de recubrimiento que llega hasta la superficie del sustrato, esta estructura se conoce como “*manifold*”, donde también se considera el agujero que permite la entrada del fluido. Además, al final de cada placa existen una especie de cuchillas (por lo general identificadas con el nombre de “*lips*” en inglés).

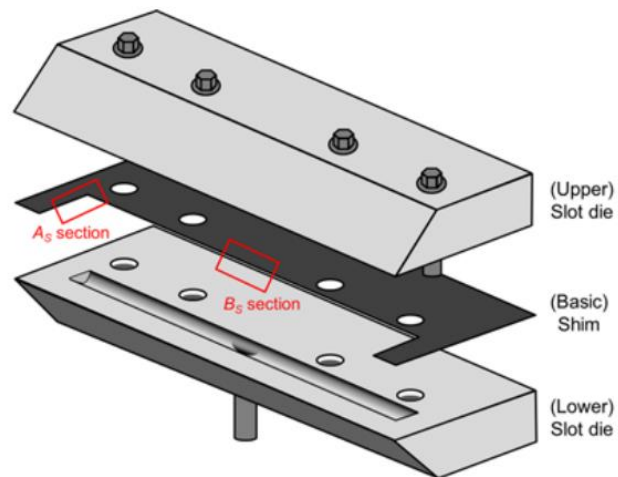


Figura 3.8. Estructura básica de un cabezal ranurado utilizado en la técnica slot die coating. Fuente: (Jin et al., 2016)

La geometría de este cabezal ranurado es esencial en cada una de las etapas del proceso de recubrimiento, las cuales se dividen en las siguientes tres:

- Trasiego de la sustancia desde el reservorio hasta el cabezal.
- Recubrimiento a un caudal y velocidad constante sobre el sustrato (vidrio).
- Interrupción del flujo del recubrimiento así como el retiro del cabezal de la zona del sustrato.

3.4.2. Caudal de suministro

Este caudal es el que debe ser suministrado al cabezal (*slot die head*). Se encuentra relacionado con las dimensiones del sustrato así como de las dimensiones del cabezal (Ver figura 3.8). Su fórmula es simple y aunque en primera instancia parece no tomar en cuenta la viscosidad del fluido de recubrimiento más adelante se demostrará como este caudal sí se ve afectado por tan característica.

Su expresión matemática es:

$$Q = WU_w h \quad (5)$$

Donde W es la dimensión de longitud del cabezal, U_w es la velocidad del cabezal y h es el espesor de la película líquida. Esta fórmula es ampliamente utilizada en todos aquellos métodos de recubrimiento que necesiten delimitar el valor de h desde un inicio, por lo que desde el origen de la técnica *slot die coating* se toma como referencia al empezar con el diseño de la matriz. (Sartor, 1990)

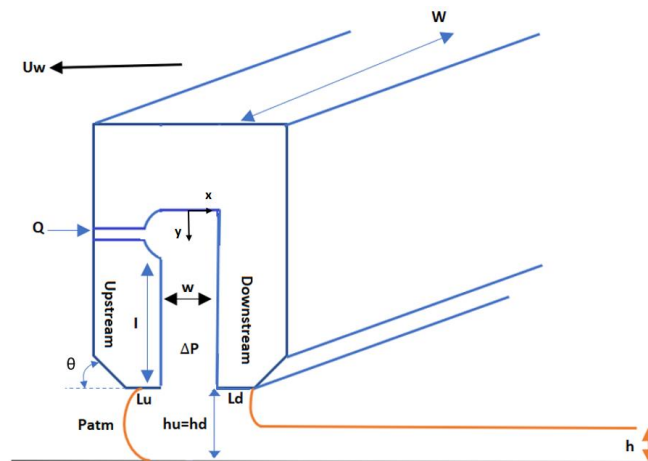


Figura 3.9. Dimensiones del cabezal. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la figura 3.9, se tiene: L_u = longitud de cuchilla aguas arriba, L_d = longitud cuchilla aguas abajo, h_u = altura desde cuchilla a sustrato aguas arriba, h_d = altura desde cuchilla a sustrato aguas abajo, w = espesor de separador, ΔP = diferencia de presión dentro del cabezal,

I = distancia desde manifold hasta cuchilla, Q = caudal de suministro, h = espesor de película líquida, U_w = velocidad lineal del cabezal, θ =ángulo de la cuchilla de la matriz y W =longitud del cabezal.

3.4.3. Caída de presión dentro de la estructura del cabezal

Una vez se inicie con el proceso de trasiego, se debe estimar la caída de presión que existe dentro de la estructura del cabezal. Esta se origina debido al estrechamiento del paso del fluido, es decir, es causada en parte por la dimensión de espesor que posee la calza o separador. También involucra otros parámetros dimensionales, los cuales se muestran en su fórmula:

$$\Delta P = \frac{12\eta l Q}{w^3 W} \quad (6)$$

Es importante no confundir l con el símbolo de inercia, ya que en este caso l representa la distancia que existe desde la parte inferior del manifold hasta las cuchillas. La letra minúscula w hace referencia al espesor del separador. Gracias a esta expresión se puede realizar la selección de w respecto al rango de viscosidades que se quieren utilizar en la máquina. (Stobo, 2017)

3.4.4. Configuración y dimensiones de las cuchillas (*upstream lip* y *downstream lip*)

Otro aspecto importante en la fabricación del cabezal, son las dimensiones de las cuchillas aguas arriba (*upstream die*) y aguas abajo (*downstream die*). Existe una gran variedad de opciones que la literatura estudiada brinda para diversas aplicaciones. Sin embargo, la gran mayoría de dichas aplicaciones utilizan sustratos flexibles y no frágiles, por lo que en este aspecto es preferible optar por información que sea tan similar como sea posible en cuanto al material a recubrir.

Con una simple búsqueda de distintos fabricantes, se observó que independientemente de las dimensiones máximas del cabezal, en los Slot Die Coaters del mercado que tenían como

finalidad el recubrimiento de piezas de vidrio, el diseño de las cuchillas siempre mostró la tendencia de poseer mismas distancias del sustrato hacia el borde de las cuchillas mismas (distancias que poseen un valor a nivel de micrómetros). Es decir, no se encontró evidencia del uso de ángulos complejos en este tipo de cabezales, las configuraciones que siempre se usan son las mismas de la figura 3.9 (c).

Ding, Liu & Harris (2016) realizaron un artículo que recopila la información más relevante hasta el año indicado sobre la técnica de *slot die coating*. Aquí se evidencia que no hay estudios sustanciales sobre el efecto del ángulo de las cuchillas en la eficiencia del mecanismo, ni se ha llegado a una forma fidedigna de calcular la relación de estos ángulos con el espesor y uniformidad del recubrimiento. Lo que se sabe hasta el momento es lo ya mencionado, sin embargo aún no hay un consenso en cuáles son los valores más indicados para optimizar el recubrimiento.

Lo que si se puede asegurar es que entre más cercanas se encuentren las cuchillas al sustrato, más delgado va a ser la película de recubrimiento mientras se encuentra húmeda. El valor de este parámetro se mencionará en el inciso del diseño de la propuesta seleccionada.

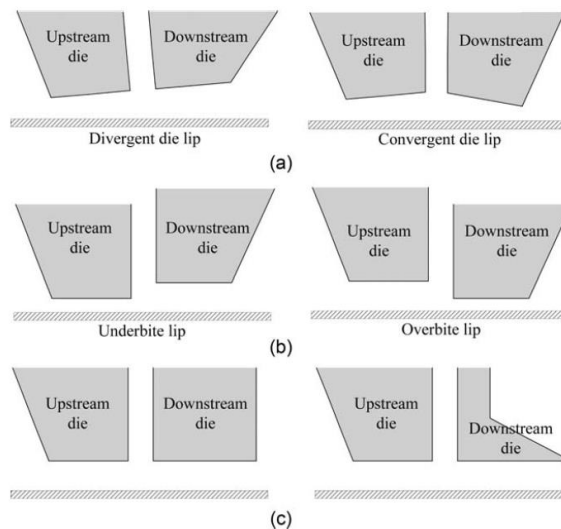


Figura 3.10. Formas de cuchillas en un Slot Die Coater. Fuente: (Ding, Liu & Harris, 2016)

Por las razones expuestas, se decidió que el aspecto a tomar en cuenta en este punto es el balance del uso del material y la conservación de las dimensiones que si tienen evidencia en cuanto a su cálculo e importancia en el conjunto. Según Kim et al (2013), en un experimento donde se utilizaron únicamente herramientas de simulación, al jugar solamente con los ángulos que hay entre el plano horizontal y el plano inclinado de las cuchillas se percibieron algunas mejoras en el espesor del recubrimiento con ciertos valores de los ángulos formados en dichos planos.

Tales ángulos se definen como θ_u y θ_d (ángulo de la cuchilla de la matriz, ver figura 3.8), situados aguas arriba y aguas abajo respectivamente. Debido a que el estudio mencionado establece que los valores de $\theta_u = 30^\circ$ y $\theta_d = 45^\circ$ muestran los mejores resultados y a que esta configuración representa un ahorro significativo en el material (por ende en costos de manufactura), se decidió utilizar los mismos valores. Además, estos son muy convenientes a la hora de maquinar cada una de las piezas.

3.4.5. Configuración y dimensiones del *manifold*

Para hacer posible el trasiego del líquido hacia el sustrato, se debe implementar un mecanismo que controle el caudal de suministro y permita llevar al mismo desde un reservorio hasta una entrada situada en la longitud media de la cavidad (ver figura 3.10). En este caso se utilizó un radio de 4 mm para el manifold o cavidad, esta medida es aproximada y se seleccionó de acuerdo a las recomendaciones de distintos artículos científicos. (Jung & Nam, 2019)

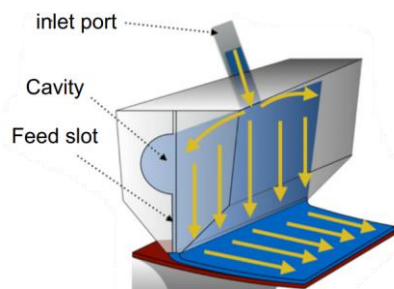


Figura 3.11. Estructura interna de un Slot Die Coater. Fuente: (Jung & Nam, 2019).

Además, se decidió que la entrada del líquido fuese en la longitud media de la cavidad, por un costado de la matriz. La entrada del caudal también puede encontrarse en la superficie superior de la matriz y no a un costado. Existen otras configuraciones donde el recubrimiento se distribuye desde un costado de la matriz pero la entrada se encuentra a un extremo del cabezal (ver figura 3.11).

Por otro lado, las cavidades pueden tener forma de “T”, o bien, de colgador de ropa. Esta última forma se usa cuando las viscosidades con las que se trabaja son muy altas. Para el presente proyecto este no es el caso, por lo que se usa la forma de cavidad más común, la de forma T. Cabe destacar que tanto el radio del manifold como la ubicación de la entrada, son parámetros que idealmente deben validarse por medio de herramientas de simulación.

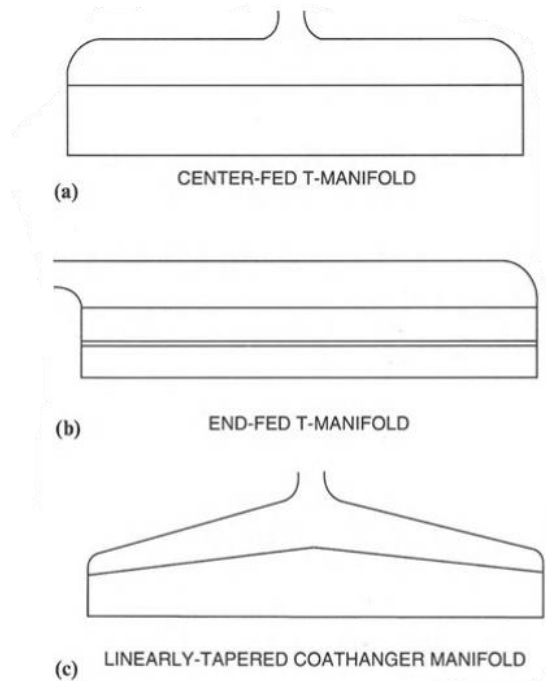


Figura 3.12. Configuraciones del manifold (cavidad) en un slot die coater: (a) entrada en el centro y manifold en forma de T, (b) entrada en extremo y manifold en forma T y (c) entrada en el centro y manifold en forma de colgador. Fuente: (Secor, 1997)

3.4.6. Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes gobiernan el comportamiento dinámico de los fluidos. Es importante destacar que para las aplicaciones conocidas de la técnica de recubrimiento aquí planteada, existen diversos modelos que describen el comportamiento del fluido en el cabezal de recubrimiento. Los hay desde modelos empíricos y meramente simulados hasta modelos fisicomatemáticos, sumamente complejos.

Sin embargo, debido al conocimiento que se posee, se hará el análisis del fluido por medio de las ecuaciones de Navier-Stokes. Esto quiere decir que el fluido se toma como uno bidimensional. Por el momento, es importante considerar que las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de continuidad se definen como:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \rho(\mathbf{U} \cdot \nabla)\mathbf{U} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{U} + \rho g \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (8)$$

Donde \mathbf{U} es la velocidad a la que se moviliza el fluido, p es la presión del mismo, ρ es la densidad y g es el valor de gravedad. (Goda et al., 2017)

Al usar estas ecuaciones se asumen ciertas condiciones del fluido, por lo que los resultados obtenidos son aproximados. Es decir, el fluido se idealiza de forma tal que es posible obtener una solución analítica al problema planteado. Para este caso, la sustancia con la que se trabaja debe cumplir con ser un fluido laminar, incompresible y estacionario.

Por las dimensiones de la máquina y el hecho de que la futura ejecución de las pruebas con el mecanismo ya fabricado se realizará en ambientes controlados de los laboratorios de la Escuela de Química del ITCR, se asume que el fluido no cambia su reología de forma abrupta y tales características reológicas se mantendrán en valores conocidos.

3.4.7. Perfiles de velocidad dentro del cabezal y su relación con el espesor de la película formada

Al aplicar las ecuaciones de la sección anterior se puede averiguar la fórmula que define al perfil de velocidad que existe entre cada una de las matrices. Este valor es de suma importancia en el cálculo y verificación de algunas de las dimensiones del cabezal que realiza el recubrimiento. El desarrollo detallado de los pasos para obtener las siguientes ecuaciones se encuentra en el apéndice 3 (memoria de cálculo).

$$V(x) = \frac{1}{2\eta} \left(-\frac{P_{atm} - \Delta P}{L} \right) (x^2 - H^2) \quad (9)$$

$$U_w = \frac{2Q'}{h_d} \quad (10)$$

$$h_{húmeda} = \frac{2Q'}{V(x)} \quad (11)$$

$$h_{seca} = h_{húmeda} \times \% \text{ de sólidos en la sustancia} \quad (12)$$

Es importante destacar que en este caso no se aplican presiones de vacío para controlar el menisco del fluido aguas abajo. Esto último es importante, ya que existen mecanismos que crean vacío al menisco del fluido durante la fase de recubrimiento, esto hace que el espesor del recubrimiento de la película húmeda quede más delgado. No se consideró dicho mecanismo para la presente propuesta ya que esto eleva los costos y solo se vuelve relevante para el futuro dispositivo a realizar con dimensiones de índole industrial.

Es importante indicar que en la ecuación 9, L es la dimensión horizontal de las cuchillas del cabezal, x es el valor horizontal donde se evaluará la velocidad y H es la mitad del valor del espesor que posee el separador. En la ecuación 10, Q' es el caudal bidimensional del fluido y h_d es la longitud desde las cuchillas del Slot Die Coater hasta el sustrato. Por último, en las ecuaciones 11 y 12 $h_{húmeda}$ es el espesor resultante de la película húmeda y h_{seca} es el espesor del recubrimiento una vez que se someta al curado UV.

3.5. Conceptos propios del diseño mecánico

En esta sección se mencionarán y explicarán de manera breve todos aquellos conceptos involucrados en el proceso de diseño del dispositivo propuesto. A través de los mismos se pretende establecer la base para gestar el diseño mecánico de una manera óptima, donde se considere la correlación existente entre cada uno de los mecanismos que lo componen. A su vez, por medio este diseño se podrán realizar simulaciones que comprueben, en una primera instancia, el buen funcionamiento de la máquina.

3.5.1. Grados de libertad (GDL)

En el diseño mecánico es indispensable realizar el correcto análisis de la cinemática y cinética de la máquina. En el primer caso se debe contemplar la forma en la que el dispositivo llevará a cabo su función, es decir, cómo se realizarán los distintos movimientos a desarrollar en tareas específicas y bajo qué condiciones de velocidad y de aceleración trabajará la máquina. Por otro lado, en la cinética se estudian las fuerzas existentes en los diversos mecanismos que conforman a la máquina.

De esta forma, resulta indispensable conocer los grados de libertad (GDL) que posee el potencial diseño de la máquina. Ya que los GDL hacen posible establecer la posición en el espacio de los elementos del sistema. En otras palabras, el GDL se define como el número de coordenadas independientes que determinan la posición de un objeto en cualquier intervalo de tiempo. Es importante destacar que los o el GDL de una máquina o mecanismo, se delimita de acuerdo a un marco de referencia determinado. (Norton, 2009)

3.5.2. Principio de D'Alembert

El análisis de un mecanismo o máquina no puede realizarse sin antes tener claro las leyes de dinámica que describen el comportamiento del cuerpo en estudio. Por medio de las leyes de

Newton es posible plantear la solución de un sistema dinámico, donde la relación de las fuerzas que actúan en el mismo con el movimiento que estos poseen puede describirse de forma matemática.

En el año 1743, el matemático Jean D'Alembert estableció el principio conocido por su nombre, el cual es una representación matemática del equilibrio dinámico. Lo enunciado por D'Alembert implica un escenario cuasi estático, donde lo que se hizo fue un reacomodo de las ecuaciones de la segunda ley de Newton. (Norton, 2009)

Este principio representa una resolución sencilla en el análisis dinámico de la máquina. Las ecuaciones involucradas en el mismo se expresan de la siguiente manera:

$$\sum \mathbf{F} - m\mathbf{a} = 0 \quad (13)$$

$$\sum \mathbf{T} - I\alpha = 0 \quad (14)$$

Donde $\sum \mathbf{F}$ es la sumatoria de las fuerzas que actúan en el sistema, m es la masa, \mathbf{a} corresponde a la aceleración, $\sum \mathbf{T}$ es la sumatoria de los pares de torsión, I es el momento de inercia y α es la aceleración angular.

3.5.3. Esfuerzos cortantes y axiales

Cuando en un cuerpo actúan una o varias fuerzas o momentos es importante realizar un apropiado análisis estructural, donde por medio de la aplicación de distintos conceptos de resistencia de materiales se puedan averiguar aquellos valores de esfuerzos que determinan la fiabilidad de la máquina o estructura. Tales esfuerzos internos se denominan como cortantes y axiales dependiendo de cómo actúe la fuerza que los provocan en la superficie que es estudiada.

Para que un cuerpo o elemento estructural sufra un esfuerzo axial (σ) debe existir una fuerza axial (también conocida como fuerza normal) que actúe de manera perpendicular al área que experimenta a la misma, además, tal fuerza debe pasar por el centroide de dicho objeto. Es

decir, la fuerza que provoca este tipo de esfuerzo hace que el elemento presente tensión o compresión dependiendo de la dirección en que la misma se aplique. Por lo tanto, el esfuerzo axial se define como:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (15)$$

Donde P es la fuerza axial interna y A es el área que contiene a P .

También es importante tener en cuenta la fórmula matemática para el esfuerzo axial máximo (σ_{max}) que puede llegar a experimentar un elemento, esto para el punto que se encuentre más alejado del eje neutro y que pertenezca a la sección transversal del elemento a analizar. Tal fórmula es la siguiente:

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (16)$$

Donde M es el momento flector interno, c es el valor de distancia que existe entre el eje neutro y el punto más alejado y I es el momento de inercia.

La definición del esfuerzo cortante (τ) es muy similar a la anterior, sin embargo, en este caso la fuerza interna que lo provoca tiene la particularidad de ser paralela a la sección transversal bajo estudio. Este esfuerzo también se conoce como esfuerzo deslizante, ya que el fenómeno que se presenta cuando el mismo existe es el deslizamiento entre segmentos. Su cálculo se puede realizar a través de la siguiente fórmula:

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (17)$$

Donde V es la fuerza interna paralela a la superficie A .

De la misma forma que el caso anterior, es relevante tener en cuenta el esfuerzo cortante máximo (τ_{max}) que se puede llegar a dar al producirse una deformación en un determinado cuerpo. Este se como:

$$\tau_{max} = \frac{Tc}{J} \quad (18)$$

Aquí los términos de la ecuación son muy similares que el caso del esfuerzo σ_{max} , a diferencia de que el T corresponde al momento de torsión interno, c es valor del radio exterior del eje y J es el momento polar de inercia. En la siguiente imagen es posible observar un ejemplo que representa a un cuerpo donde actúan cargas externas sobre el mismo. En esta figura se muestran las fuerzas y momentos internos que interactúan en el mismo.

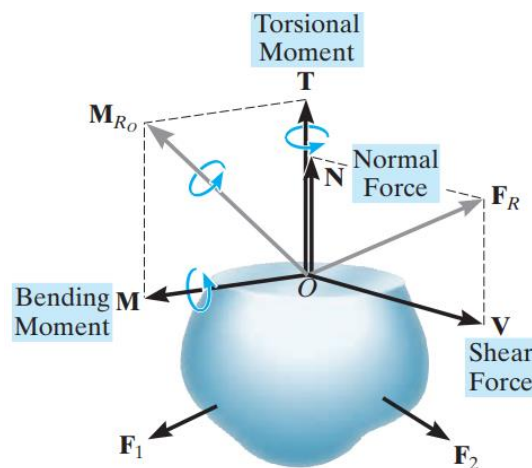


Figura 3.13. Ejemplo de las fuerzas internas y momentos internos en un cuerpo. Fuente: (Hibbeler, 2011).

3.5.4. Criterio de falla (Von Mises)

En todo diseño mecánico es primordial asegurar la funcionalidad del mismo por medio del correcto análisis de fallas de los componentes de la máquina. En aquellos elementos que sean de materiales dúctiles, es posible aplicar el criterio de Von Mises. Este permite que de forma matemática se establezca que tan seguro es un componente estructural, esto por medio del análisis de los esfuerzos principales que existen y las características del material, como el módulo de rigidez.

El criterio de Von Mises establece que la fiabilidad de un componente estructural se encuentra relacionada al valor de energía de distorsión máximo que posee el material para cada

unidad volumétrica del mismo. A su vez, lo anterior se relaciona con el esfuerzo requerido para distorsionar una probeta que presente las mismas características o propiedades físicas y químicas, esto por cada unidad volumétrica. (Beer et al., 2017)

A través de la aplicación de este criterio, es posible calcular un esfuerzo equivalente. Este ayudará a facilitar los cálculos del diseño mecánico, además es una aproximación bastante acertada que indica la posibilidad de falla de un elemento. Tal y como se muestra a continuación, este esfuerzo equivalente se encuentra en términos de los esfuerzos principales que están presentes en el elemento a analizar.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Por medio del cálculo del σ_e es posible averiguar el factor de seguridad. Este valor es de especial importancia ya que además de garantizar el buen desempeño de un determinado elemento, es un parámetro importante a la hora de dimensionar el diseño mecánico. Esto permite lograr un balance óptimo entre la funcionalidad de la máquina y los costos asociados a su construcción. En términos generales, el factor de seguridad (FS) se define como:

$$FS = \frac{\text{Esfuerzo último}}{\text{Esfuerzo permisible}} \quad (20)$$

3.5.5. Análisis a fatiga (Método ED-Goodman)

Cuando un elemento se encuentra en movimiento debe realizarse un análisis de fatiga. En este caso, el eje del actuador estará en rotación durante el proceso de la aplicación del recubrimiento. De acuerdo a Budynas & Nisbett (2018), un buen método para determinar la resistencia a la fatiga es el criterio de falla de Goodman. Este método se caracteriza por ser

conservador, por lo que los resultados obtenidos en los cálculos se pueden considerar como más confiables en comparación con otros métodos.

Para tener certeza de la funcionalidad del elemento que se analiza bajo este método es importante conocer el factor de seguridad, el cual resulta ser el inverso de la siguiente ecuación. Si este es mayor a 2, se puede asegurar que la pieza no fallará bajo las cargas analizadas.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left[\frac{1}{S_e} (4(k_f M_a)^2 + 3(k_{fs} T_a)^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} (4(k_f M_m)^2 + 3(k_{fs} T_m)^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (21)$$

Para poder calcular el factor de seguridad mencionado anteriormente, es necesario utilizar la ecuación de Marin. Esta se describe como:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e' \quad (22)$$

Donde:

$$S_e' = 0,5 S_{ut} \quad (23)$$

Cada uno de los factores que se presentan en la ecuación 22 deben consultarse con la bibliografía. Algunos de estos están sujetos a selección mientras que otros deben calcularse por medio de las siguientes ecuaciones.

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (24)$$

$$k_b = 1,24 d^{-0,107} \quad (25)$$

Por otro lado, cuando se presenta la condición de un eje rotatorio, el esfuerzo a flexión será completamente invertido. Es de esta forma que se puede analizar si el elemento fallará de acuerdo al valor del límite elástico, ya que si el esfuerzo es mucho menor a dicho valor, se asegura la correcta funcionalidad del elemento.

3.5.6. Lubricación en mecanismos

Cuando una máquina tiene uno o varios mecanismos que poseen movimiento entre sí, es común que la fricción que estos presentan comprometa el funcionamiento del dispositivo. Es por ello que se debe pensar en el tipo de lubricación que se aplicará a elementos como los rodamientos o cojinetes deslizantes, esta permitirá que la pieza no se desgaste y que a su vez se disminuya la fricción de la misma.

En secciones posteriores se ampliará el tema de cojinetes y rodamientos, por ahora es importante tener en cuenta que la selección de estos y de su respectiva lubricación, depende de múltiples factores. Entre estos se debe considerar la velocidad de giro del elemento a lubricar, las dimensiones del mismo, la temperatura de funcionamiento y la viscosidad requerida.

El tipo de lubricación del cojinete o rodamiento influye directamente con su vida útil. Dentro de los principales tipos de lubricación que existen, se encuentran: lubricación hidrodinámica, de película mezclada y al límite. Estos tipos se definen según la separación que existe entre las superficies que se deslizan. Por otro lado, la viscosidad del lubricante determinará su selección, esto de acuerdo a los grados SAE, ISO o AGMA. (Juvinall & Marshek, 2017)

3.5.7. Sujeciones fijas y removibles

En todo mecanismo es necesario aplicar diversos métodos de sujeción, esto ya sea manteniendo a un elemento en específico unido a otro de forma permanente o realizando una unión desmontable. La selección de un método u otro depende de la finalidad que posea el mecanismo, por lo que es importante entender cuales son las aplicaciones de cada uno de dichos métodos.

En el caso de la sujeción fija es posible usar elementos como remaches, o bien, la aplicación de adhesivos o soldadura. Si se utiliza soldadura se debe considerar el tipo y el

material de aporte a utilizar en el proceso. En este tipo de sujeción es importante remarcar que una vez se realice, el mecanismo permanecerá en este estado durante toda su vida útil. Además, si en algún momento la unión se requiere separar, es probable que la pieza sufra daños o se deteriore. Por otro lado, las sujeciones removibles se llevan a cabo por medio del uso de elementos roscados, chavetas, pasadores, guías, ejes estriados, etc. En este tipo de sujeción los elementos roscados son los más comunes en el ensamble de mecanismos.

3.5.8. Tornillos de potencia

La transmisión de potencia a través de tornillos resulta ser de gran utilidad para el diseño de distintos mecanismos, esto debido a la simplicidad constructiva que estos presentan. También, suelen ser muy útiles para transformar el movimiento rotativo en lineal, lo cuál resulta de especial interés para el proyecto. Gracias a la implementación de este tipo de tornillos es posible el control del movimiento axial de una máquina, por lo que es común utilizarlos en instrumentos de medición como los micrómetros o en máquinas herramienta como los tornos.

El perfil de la cuerda del tornillo puede ser de diferentes geometrías, donde los tipos más comunes suelen ser de cuerda cuadrada, ACME o reforzada. De acuerdo a estas, el análisis de las fuerzas y torques en el tornillo variará. En general, según lo mostrado en la figura 3.6, el ángulo de avance λ se define como:

$$\tan \lambda = \frac{L}{\pi d_p} \quad (26)$$

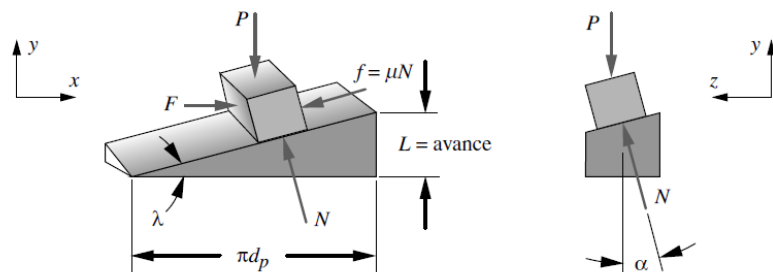


Figura 3.14. Diagrama de fuerzas en un tornillo de potencia. Fuente: (Norton, 2011)

A su vez, para una cuerda de tipo ACME, los torques de elevación y descenso de una carga son respectivamente los siguientes:

$$T_u = T_{su} + T_c = \frac{Pd_p}{2} \frac{(\mu\pi d_p + L\cos\alpha)}{(\pi d_p \cos\alpha - \mu L)} + \mu_c P \frac{d_c}{2} \quad (27)$$

$$T_d = T_{sd} + T_c = \frac{Pd_p}{2} \frac{(\mu\pi d_p - L\cos\alpha)}{(\pi d_p \cos\alpha + \mu L)} + \mu_c P \frac{d_c}{2} \quad (28)$$

Donde α es el ángulo radial de la cuerda, μ es el coeficiente de fricción y los demás parámetros están dados en la figura anterior. Cabe destacar que si en estas ecuaciones se sustituye $\alpha = 0$ se obtienen los torques para una cuerda de tipo cuadrado. Por otro lado, es importante tener en cuenta que la eficiencia de un tornillo de potencia esta dada de acuerdo a la geometría de la cuerda y el coeficiente de fricción μ . (Norton, 2011)

3.5.9. Cojinetes y rodamientos

Los cojinetes y rodamientos son elementos esenciales en cualquier máquina que posea movimiento rotativo en sus una o varias de sus partes constituyentes. La principal diferencia entre un cojinete y un rodamiento es que el primero posee fricción de deslizamiento mientras que el último presenta fricción de rodamiento. Es decir, los cojinetes deslizantes se apoyan en superficies de sostén mientras que los rodamientos poseen en su estructura elementos como rodillos o bolas que se encuentran separando al eje del exterior.

La selección de estos elementos dependerá de varios factores, como por ejemplo: tipo de carga a soportar, dimensiones como el diámetro interior y exterior del elemento y sus velocidades nominales. En cuanto a los rodamientos existe una amplia gama de configuraciones o tipos de estos, cada uno con una función en específico. Es importante consultar la literatura de los diferentes fabricantes para seleccionar aquellos que se ajustan más a las necesidades de la máquina. En el caso de los cojinetes deslizantes se pueden encontrar los de buje de casquillo o de

dos piezas, así como los cojinetes de lubricación limite y de empuje. Estos últimos son de especial importancia en el diseño de chumaceras. (Budynas & Nisbett, 2018)

Es importante señalar que en el proceso de diseño la selección de los rodamientos puede verse influenciada por la vida útil de los mismos. La vida nominal está estrechamente relacionada a la confiabilidad del rodamiento, esta se puede calcular por medio de las ecuaciones brindadas por diversos fabricantes. Por otro lado, para la selección de los cojinetes deslizantes es importante tomar en cuenta la carga proyectada en el cojinete por cada unidad de área así como la viscosidad requerida del lubricante.

3.5.10. Motores a pasos

Según Conti (2005), los motores a pasos son dispositivos que trabajan mediante el cambio que existe del flujo electromagnético en sus bobinas. Estos se componen de elementos como el rotor y el estator, lo que hace que su principio de funcionamiento sea semejante al de un motor sincrónico. Además, al momento de realizar la rotación de su eje, cada modelo posee un paso característico, el cual se refiere al ángulo que se genera de acuerdo a la excitación de sus bobinas.

En la actualidad, este tipo de motores son muy comunes en aplicaciones de alta precisión. Es frecuente observarlos en máquinas como las CNC o impresoras 3D. Su selección es vital para poder llevar a cabo la función deseada en la máquina. Es por ello que se debe saber el valor del torque que debe entregar el motor a pasos, este se define como:

$$T_{Total} = T_a + T_L \quad (29)$$

Donde T_a y T_L están dados por:

$$T_a = T_d = \frac{(J_{Total} + J_o) RPM}{9,55 \times t_{aceleración}} \quad (30)$$

$$T_L = \frac{F_{operación} \times L}{2\pi \times n} + \frac{\mu \times F_{precarga} \times L}{2\pi} \quad (31)$$

En la sección de diseño se ampliará más sobre cada uno de los parámetros de estas ecuaciones.

3.5.11. Plan de mantenimiento basado en confiabilidad (RCM)

Un plan de mantenimiento basado en confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) permite evaluar este aspecto en los elementos que conforman a un dispositivo electromecánico. De acuerdo a Garrido (2010), un plan de mantenimiento de este tipo, ayuda a tener una mejor organización de las actividades que se realizan en pro del resguardo de cada una de las máquinas que conforman a una línea de producción.

Para poder llevar a cabo un RCM, es necesario identificar la criticidad de cada uno de los equipos. De acuerdo a esta se deben implementar acciones de índole preventivo, que ayuden a prolongar la vida útil de los dispositivos evaluados. En el presente proyecto, se hará un RCM para el sistema más crítico de la propuesta planteado. Esto a la vez dará un panorama más claro de como debe operarse la máquina y cuáles podrían ser los costos asociados al mantenimiento de la misma.

3.5.12. Herramientas de simulación

Todo diseño mecánico debe ser verificado mediante alguna herramienta que proporcione datos fehacientes de su funcionalidad. Esto no solo se limita a la experimentación, sino que también existen diferentes herramientas computacionales que muestran una gran variedad de ventajas en el campo ingenieril.

La versatilidad que poseen algunos softwares de fácil acceso para el usuario, representa un enorme beneficio a todos aquellos proyectos que involucren la creación de mecanismos complejos. Esto ya que a través de la simulación de la máquina en estudio se pueden obtener gráficos y valores específicos que ayudan a comparar los resultados teóricos del proyecto.

Un ejemplo de un software que posee un sinnúmero de funciones para la comprobación del correcto funcionamiento de un mecanismo es SolidWorks. Para el desarrollo de la propuesta del dispositivo para realizar recubrimientos termocrómicos es de especial interés el complemento llamado SolidWorks Motion.

Mediante el uso de SolidWorks Motion se pueden realizar análisis de índole cinemático y dinámico en cuerpos rígidos que han sido ensamblados previamente. Estos análisis permiten observar la forma en la que se logra mover el diseño en estudio, esto en un entorno con condiciones especificadas dentro del mismo software. Lo que hace interesante a esta herramienta es que existe la posibilidad de agregar fuerzas externas, diferentes tipos de motores, seleccionar el tipo de estudio deseado, etc. (SolidWorks Education, 2009)

Es así como una vez delimitados todos los parámetros del análisis, se pueden obtener cálculos hechos por el software, como lo son: aceleración, tiempo, torque, fuerzas, esfuerzos, par en motores, velocidad, potencia, entre otros. Por supuesto que tales resultados pueden ser comparados con los cálculos teóricos y de esta manera la confiabilidad de la máquina puede ser analizada, así como preveer posibles mejoras en el diseño.

Por otro lado, se debe mencionar que existen opciones dentro de SolidWorks para el análisis de la dinámica de fluidos. Este tipo de herramientas se conocen como dinámica de fluidos computacionales (CFD). Debido a la índole del proyecto, el alcance de SolidWorks en este tema se ve limitado. Es por ello que se recomienda hacer uso de softwares más especializados como ANSYS o COMSOL Multiphysics.

Hacer un estudio de CFD por medio de estas herramientas está fuera del alcance del presente proyecto, esto debido a su complejidad. Sin embargo, es importante tener en cuenta estas posibilidades ya que es una excelente opción para mejoras futuras en el dispositivo. Así

como para poder generar más confiabilidad en fases posteriores a este proyecto, donde se va requerir escalar las dimensiones del dispositivo a un nivel industrial. Por el momento, las referencias encontradas en el mercado sobre mecanismos similares y los cálculos realizados son suficientes para el diseño del dispositivo.

4. Comportamiento del recubrimiento y requerimientos del dispositivo

En esta sección se mostrarán en detalle los aspectos que interfieren en el diseño, esto desde el punto de vista reométrico y desde los datos técnicos previamente investigados o medidos con el fin de la elaboración del mecanismo.

4.1. Características del recubrimiento

Antes de mencionar los valores con los que se cuenta hasta el momento, asociados al recubrimiento termocrómico, es importante establecer las fases de la investigación doctoral a la que se liga el presente trabajo de graduación.

Hasta la fecha, el proyecto de investigación por parte de la M.Sc. Natalia Murillo, se encuentra en una fase de experimentación. En esta fase se están haciendo pruebas del material termocrómico en portaobjetos de laboratorio, además, la sustancia para recubrir aun se encuentra sujeta a cambios. Se planea que luego de fabricar el dispositivo propuesto en este trabajo, se pueda llegar a escalar tal dispositivo para vidrios de ventanas más comerciales.

Justamente en el hecho anterior reside la importancia del presente trabajo de graduación. Por lo que es necesario recalcar que pese a que las siguientes características del recubrimiento pueden verse alteradas en un futuro, las mismas serán tomadas como punto de partida para los cálculos. Por otro lado, el diseño estará pensado para rangos de valores y no en algún valor finito.

Actualmente las sustancias base que se están utilizando son los adhesivos ópticos de la empresa Norland Products Inc, cuyos nombres son: NOA 89H y NOA 13685. Estos adhesivos se usan de forma independiente, por lo que aunque sus características son muy similares se mostrará una tabla que recopila la información de la ficha técnica de cada uno y de otras fuentes asociadas a las mismas.

Tabla 4.1. Características reométricas y propiedades del NOA 89H. Fuente: Norland Products Inc.

Característica/Propiedad	Descripción
Viscosidad a 25 °C	15-20 cps
Densidad	> 1
Almacenaje	5°C - 25°C
Solubilidad en agua	No soluble
Temperatura de polimerización	65°C
Presión de vapor	< 0,1
Índice de refracción	1,51
Rango de temperatura	-30°C - 80°C
Alargamiento a la rotura	9,50%
Módulo	4300 psi
Resistencia a la tracción	194,5 psi
Dureza (Shore D)	40
Reactividad	Necesario recubrimiento de PTFE
Estabilidad	Mantener alejado de la luz solar y UV

Tabla 4.2. Características reométricas y propiedades del NOA 13685. Fuente: Norland Products Inc.

Característica/Propiedad	Descripción
Viscosidad	15-25 cps
Densidad	> 1
Almacenaje	5°C - 25°C
Solubilidad en agua	-
Temperatura de polimerización	65°C
Presión de vapor	< 0,1
Índice de refracción, película curada	1,3685
Rango de temperatura	-15°C - 90°C
Dureza (Shore D)	55
Reactividad	Necesario recubrimiento de PTFE
Estabilidad	Mantener alejado de la luz solar y UV

4.2. Parámetros técnicos y estructurales del dispositivo

Para el diseño del dispositivo se pretende maximizar el costo-beneficio del producto. Es por ello que a través de la lectura de diferentes fuentes bibliográficas y los valores ya conocidos para el diseño, se hará un estudio detallado de las opciones existentes en el mercado y la manufactura del producto desde cero.

En lo que a este inciso refiere, a continuación se brindará una tabla que resume los parámetros técnicos y estructurales del Slot Die Coater diseñado. Se debe puntualizar que en tal tabla aún no se incluyen los valores obtenidos por medio de los cálculos, por lo que al final del documento se adjuntará una hoja de datos del dispositivo en los apéndices. Además de esta hoja de datos, los planos y la memoria de cálculo que dará sustento a lo que se plantea durante todo el documento, estarán en el mismo apartado.

También, en la siguiente tabla se muestra lo anteriormente mencionado, incluyendo una columna titulada como “CPD” (critico para diseño). Tal columna tiene el objetivo de señalar por medio de un símbolo de “equis” a aquellos valores que no pueden ser cambiados. Esto es importante ya que a partir de este tipo de información, se deben hacer los cálculos pertinentes para cumplir con todos los requerimientos que el cliente imponga.

Tabla 4.3. Parámetros técnicos y estructurales del Slot Die Coater. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Valor	Descripción	CPD
Espesor de la película seca	40 nm-100 nm	Este valor no se ha llegado a medir en la investigación doctoral, sin embargo la literatura indica que para conservar las características termocrómicas se debe mantener el valor indicado, esto para películas de VO ₂ dopadas con W. (Kamalisarvestani, Saidur, Mekhilef, & Javadi, 2013)	
Dimensiones de la base de la estructura	50 cm × 45 cm	Base de hierro fundido otorgada en la UCR.	✗
Espesor de la base	3/8 "	Se debe devastar una cara de la base para poder realizar un agujero donde se posicione el vidrio.	✗
Profundidad del desbaste de la base	6 mm	Contiene al vidrio de 20 cm × 20 cm.	✗
Agujero recuperación de material	5 cm × 22 cm	Es importante recuperar el sobrante del recubrimiento de VO ₂ , debajo del agujero se pondrá un recipiente recubierto con PTFE.	
Indicador para la regulación de la altura del cabezal	0,001 mm (resolución)	Por medio del uso de un indicador de altura se llega a obtener un espesor preciso.	
Longitud del cabezal	Al menos 20 cm.	Esta longitud determinará la geometría del manifold del slot die coater.	✗
Extracción del vidrio	-	Realizar agujero para que se pueda extraer el vidrio una vez recubierto.	
Velocidad del cabezal	V _{max} aprox = 25mm/s	Rango recomendado para la velocidad de avance del cabezal. A mayor velocidad, mayor será el espesor mínimo húmedo. (Kim, Shin, Lee & Park, 2019)	✗
Reactividad y estabilidad del recubrimiento	-	Realizar recubrimiento de teflón al cabezal (elementos internos y cuchillas), esto para asegurar que el fluido mantenga las características termocrómicas.	
Viscosidad del recubrimiento	Min: 15 cps - 25 cps Max: 170 cps	El sistema debe ser capaz de manejar viscosidades desde 15 cps. El cliente requiere que la máquina sea capaz de manejar aproximadamente una viscosidad 10 veces mayor a la mínima.	✗
Superficie del vidrio	20 cm x 20 cm	Se requiere recubrir un área de 20 cm x 20 cm	✗

5. Selección de propuesta de diseño

Se debieron analizar los posibles mecanismos para recubrir una superficie de vidrio. Por lo que en un principio se plantearon 3 escenarios distintos basados en el tipo de cabezal que hiciese posible el trasiego preciso de la sustancia desde el mismo hasta la superficie plana, es decir, la técnica de recubrimiento. Una vez descartadas las dos alternativas menos convenientes, se decidió hacer distintas versiones del mecanismo ya seleccionado. Esto para evaluar qué elementos reguladores de la altura del cabezal al vidrio son los más idóneos, así como para analizar qué tipo de actuador lineal es el más indicado para realizar el movimiento que requiere la máquina.

Es importante destacar que en este tipo de proyecto existe un valor agregado sobre el conocimiento que se está generando. Es decir, aunque el aspecto económico representa un punto importante a la hora de comparar las alternativas, los resultados que se pueden llegar a obtener en la fase de experimentación de la investigación doctoral son de gran relevancia para la innovación científica y tecnológica.

5.1. Selección preliminar de alternativas (Técnica de recubrimiento)

En primera instancia se pensó en tres alternativas que se basaron en la técnica de recubrimiento a utilizar. A continuación se muestra una breve descripción de cada una.

- **Alternativa 1: Slot Die Coater**

Algunos conceptos sobre esta alternativa ya se han mencionado en incisos anteriores. Lo que hace atractiva a esta propuesta es el hecho de los grandes rangos de viscosidades con los que se puede contar. También, es un método que puede ser escalable a una gran variedad de dimensiones. La técnica utilizada para realizar el recubrimiento en esta opción es el *slot die coating*. Aquí se puede empezar a diseñar con un valor predeterminado en la variable del espesor

húmedo de la película (obtenido durante el recubrimiento). Esto hace posible que la geometría del diseño se base en un resultado idóneo de espesor de acuerdo a la aplicación requerida.

Las viscosidades con las que se pueden trabajar van desde 1 mPa·s hasta varios kPa·s. Pese a esta gran ventaja, existen varios retos a la hora de implementar tal alternativa. Por ejemplo, los costos de este mecanismo suelen ser altos, ya que es necesario el uso de materiales como el acero inoxidable (esto debido al mecanizado del cabezal y por la necesidad de evitar la corrosión). También, los dispositivos para modular la distancia que va desde las cuchillas del cabezal hasta el sustrato suelen ser muy costosos, ya que deben ser altamente precisos.

Además, en el ámbito de las ventanas termocrómicas es muy difícil encontrar información sobre esta técnica. De hecho, casi toda la información que se encuentra disponible es acerca de *slot die coaters* utilizados en sustratos flexibles, donde se usan rodillos que ejercen tensión al sustrato para así obtener espesores extremadamente pequeños. O bien, se pueden encontrar *slot die coaters* para aplicaciones en las que utilizan vidrios del tamaño de un porta muestras de laboratorio, lo cual es muy pequeño de acuerdo al objetivo del presente proyecto.

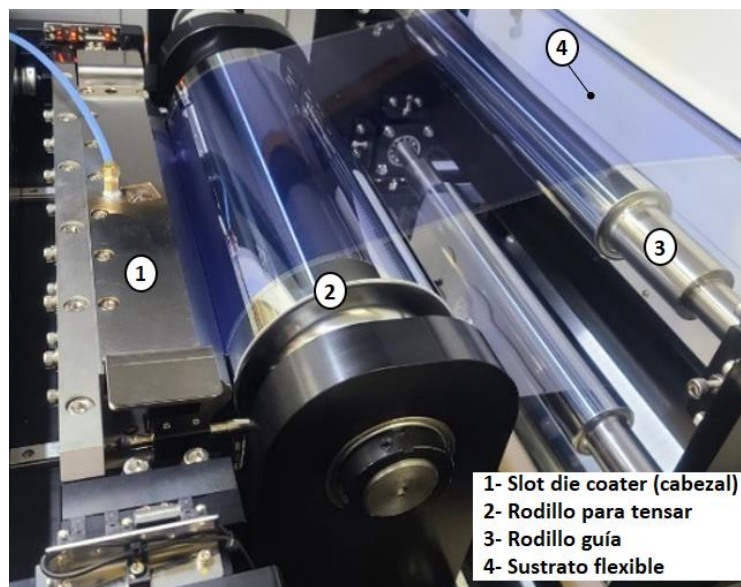


Figura 5.1. Ejemplo de slot die coater para sustrato flexible, generalmente usado en aplicaciones industriales.
Fuente: dcnano.com

- **Alternativa 2: Mecanismo de Inyección**

Otra técnica estudiada para realizar el recubrimiento fue la de inyección de la sustancia sobre el sustrato de vidrio. Este mecanismo es similar al utilizado en las impresoras de inyección de tinta. Sus principales ventajas son su bajo costo y su la gran disponibilidad de piezas que existe en el mercado. Esto ya que en las fuentes bibliográficas estudiadas, se encontró evidencia de fabricación de materiales termocrómicos por medio del uso de cabezales de impresoras. Es decir, estos dispositivos se pueden adaptar a las necesidades del recubrimiento termocrómico.

Sin embargo, los experimentos que se han realizado para dichos materiales tienen la particularidad de usarse en sustratos flexibles (telas) y con tintas termocrómicas de una viscosidad muy baja, por lo que esto es un gran inconveniente para lo que se busca en el presente trabajo. Por otro lado, en este caso debe realizarse un cálculo de la morfología de las gotas que se depositan en el sustrato, ya que de esto dependerá la uniformidad del recubrimiento.

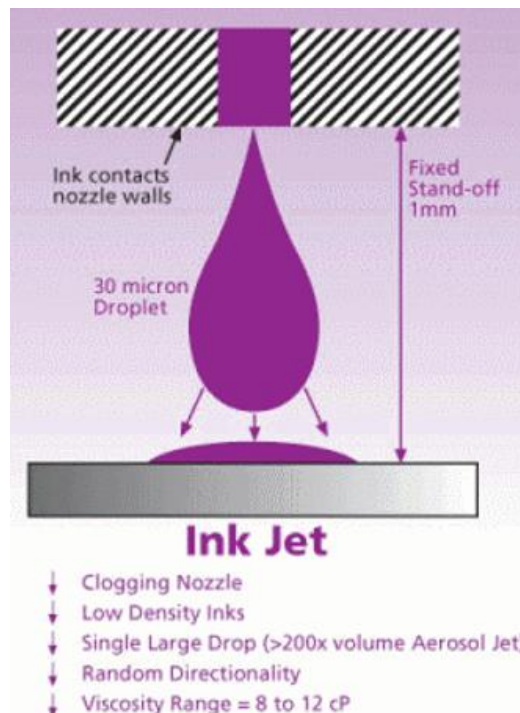


Figura 5.2. Características del recubrimiento por inyección. Fuente: researchgate.net

- **Alternativa 3: Mecanismo de Aerosol**

En este caso el mecanismo deberá utilizar un cabezal de aerosol. Esta técnica es muy similar al proceso conocido como “*sandblasting*”, el cual se usa como tratamiento previo a diferentes recubrimientos a nivel industrial. Como se pretende tener una superficie máxima de recubrimiento de 20 cm × 20 cm, esta técnica resulta atractiva ya que se cuentan con mecanismos similares para gran rango de tamaños de superficie.

Sus principales beneficios son su bajo costo en relación con la alternativa 1, además, como el medio para dispersar la sustancia es un aerosol, se pueden usar una amplia variedad de valores de viscosidades. En contraste con lo anterior, esta alternativa posee la desventaja de no ser tan precisa como la alternativa 1 (el espesor final de la película es difícil de estimar, así como la distancia a la que se debe colocar el aerosol), además los recubrimientos con esta técnica no suelen ser tan uniformes como si lo son en la técnica *slot die coating*.

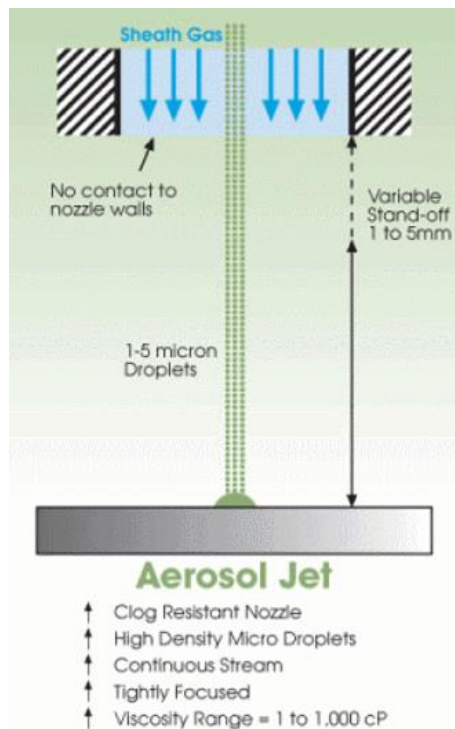


Figura 5.3. Características del recubrimiento por aerosol. Fuente: researchgate.net

Una vez se hayan identificado las características de recubrimiento de cada alternativa, se debe iniciar con la matriz de decisión que ayudará a determinar la técnica ideal para el proyecto. Antes de pasar a observar tal matriz, es importante tener en cuenta el costo aproximado de los materiales por cada alternativa. Se realizó un estimado de las piezas que podrían necesitarse en cada caso, cotizando el valor de cada una se llegó a los resultados mostrados en la tabla 5.1 (estos son solo costos preliminares, más adelante se dará el costo detallado de la propuesta finalmente seleccionada). Para ver a detalle cada una de las cotizaciones con la respectiva lista de partes, ver el Apéndice 2.

Tabla 5.1. Costos preliminares aproximados de cada una de las alternativas. Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Costo total
Alternativa 1	€1 000 000
Alternativa 2	€450 000
Alternativa 3	€650 000

De acuerdo a lo anterior se realizó la siguiente matriz de decisión, donde se escogieron los siguientes parámetros, cada uno puede obtener un valor del 1-5, siendo 1 el menos favorable y 5 el más favorable.

- Costo: tiene un peso del 15% en la selección de la propuesta. Se le asigna este valor tan bajo, ya que en esta selección preliminar el objetivo principal es decidir cuál propuesta es la más idónea para la función de la máquina.
- Rango de viscosidad: tiene un peso del 25% en la matriz de decisión. Este valor es crítico, al igual que los siguientes dos valores. Por tal razón, este aspecto toma un valor alto en la decisión final.

- Uniformidad del recubrimiento: también posee un 25% en el peso de la decisión. Este aspecto es muy importante para obtener un producto final funcional y que cumpla con los requisitos.
- Precisión: al igual que los anteriores representa un 25% del 100% en la matriz de decisión. Se refiere a la posibilidad de modular con precisión el espesor del recubrimiento.
- Cálculo de variables: tiene un valor del 10% en la toma de la decisión. Se atribuye a la facilidad de calcular aspectos como la altura a la que debe ser depositado el recubrimiento, así como el cálculo de la película húmeda del mismo.

De esta forma se determinó que la alternativa idónea respecto a los aspectos evaluados es la alternativa 1, por lo tanto con esta se continuará trabajando en el resto del diseño. La decisión se toma de acuerdo a los factores de ponderación ya discutidos, así como la puntuación individual de cada una de las características evaluadas. Esta forma de llegar a una decisión facilita el análisis en lo que queda del diseño, ya que los resultados obtenidos engloban las características más importantes de acuerdo a los requerimientos del futuro usuario de la máquina a desarrollar. (Norton, 2009).

Lo anteriormente expuesto se detalla en la siguiente matriz de decisión:

Tabla 5.2. Matriz de decisión de alternativa preliminar. Fuente: Elaboración propia.

	Costo	Rango de viscosidad	Uniformidad del recubrimiento	Precisión	Cálculo de variables	Rango
Factor de ponderación	0,15	0,25	0,25	0,25	0,1	1
Alternativa 1	2 0,3	5 1,25	5 1,25	5 1,25	3 0,3	4,35
Alternativa 2	5 0,75	1 0,25	3 0,75	2 0,5	2 0,2	2,45
Alternativa 3	4 0,6	4 1	3 0,75	2 0,5	2 0,2	3,05

5.2. Selección final de alternativas (Accionamiento lineal y Modulación de altura)

Una vez seleccionada la alternativa 1, es importante analizar que componentes son vitales para tal propuesta. Para este inciso se variarán el tipo de elementos que modulan la altura que va desde el sustrato hasta las cuchillas del cabezal, también se variarán los tipos de actuador lineales para cada una de las siguientes 3 propuestas.

- **Alternativa 1.1 (Indicador de altura y actuador con tuerca precargada)**

Esta alternativa consiste en el uso de un indicador de altura digital, como el que se muestra en la figura 5.4. Este dispositivo cumplirá con la función de mostrar el valor longitudinal que se encuentra entre las cuchillas del cabezal y el sustrato. Es un aparato altamente preciso, con una resolución de 0.001 mm, para la cotización se seleccionó un indicador marca Mitutoyo.



Figura 5.4. Indicador de altura. Fuente: mitutoyo.com

Además, se decidió usar junto con esta opción, un actuador lineal compuesto por una varilla roscada métrica trapezoidal y una tuerca con precarga. Este tipo de elementos permiten una movilidad lineal muy precisa. Se prevé que la tuerca se ensamble con una carcasa de la misma, la cual soportará el peso del ensamble del cabezal del slot die coater. Esto se puede observar a mayor detalle en la figura 5.5.

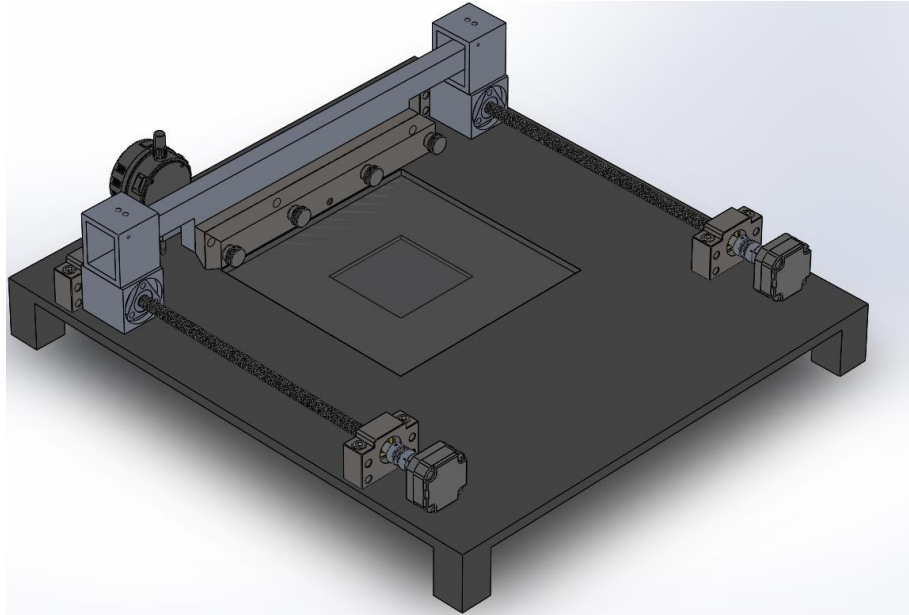


Figura 5.5. Ensamble preliminar del slot die coater (Alternativa 1.1). Fuente: Elaboración propia.

- **Alternativa 1.2 (Micrómetros y actuador con tuerca precargada)**

Esta alternativa es muy similar a la anterior, con la diferencia de que en este caso se usan dos micrómetros digitales, uno a cada lado del cabezal, para modular y mostrar el valor de altura requerido (desde las cuchillas hasta el sustrato). Se decidió que en este caso se conserva el tipo de actuador lineal, es decir, esta alternativa y la anterior usan los mismos elementos como actuadores lineales. Cabe destacar que la función de la tuerca con precarga es tener un ajuste más preciso con la varilla roscada, de esta manera se logra obtener un movimiento más preciso y natural. Este tipo de elementos se pueden observar en la figura 5.6.



Figura 5.6. Actuador lineal de varilla trapecoidal y tuerca. Fuente: thomsonlinear.com

- **Alternativa 1.3 (Indicador de altura y actuador de husillo de bolas)**

En este caso se conserva el uso del indicador de altura. Tanto en esta alternativa como en la alternativa 1.1, es necesario solamente uno de estos elementos. La razón de esto es porque la finalidad de la máquina es realizar un recubrimiento de una sola capa, es decir, cuando se requieren varias capas (una encima de otra) se necesita de dos indicadores para modular las alturas entre cada capa.

La diferencia en este caso es el uso del actuador lineal compuesto por un husillo de bolas (ver figura 5.7). Este tipo de actuadores permiten un movimiento más suave y preciso, por lo que se usan en aplicaciones de alta precisión. Sin embargo, su costo suele ser mayor y tanto su mecanizado como cálculos teóricos son más complejos que los anteriormente mencionados.



Figura 5.7. Actuador lineal con husillo de bolas. Fuente:directindustry.es

Se realizaron cotizaciones preliminares para cada una de estas alternativas, estos son aproximadamente:

Tabla 5.3. Costos preliminares de cada una de las alternativas para la selección final. Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Costo total
Alternativa 1.1	€1 167 932
Alternativa 1.2	€1 217 660
Alternativa 1.3	€1 494 020

Posterior a esto se realizó la siguiente matriz de decisión. De igual forma al inciso anterior, se siguieron las recomendaciones de Norton (2009). A través de esto se concluye que la alternativa más indicada es la alternativa 1.1, por lo que esta es la alternativa a diseñar. Se debe resaltar que la escala de puntuación de cada uno de los parámetros evaluados va del 1 al 5 (1 representa una puntuación menos favorable y 5 simboliza una la puntuación más favorable).

Los parámetros que se tomaron en cuenta en esta selección fueron los siguientes:

- Costo: posee un factor de ponderación del 25%. En esta sección el costo tiene un peso mayor, ya que lo que se está analizando es la forma de modular la altura y el elemento de transmisión de potencia. Es decir, estas alternativas son más específicas de acuerdo a los requerimientos del cliente, por lo que la toma de decisión del dispositivo a diseñar, prioriza en mayor medida el costo final. Tal costo es un estimado, donde una vez se seleccionó la alternativa óptima, se detalló el costo de la misma, obteniendo así un valor más realista.
- Uso experimental: tiene un peso del 15% en la toma de decisión. Hace referencia a la aplicación del dispositivo. Es decir, de acuerdo a las especificaciones del cliente el dispositivo debe ser funcional para la etapa experimental en la que se encuentra el proyecto de investigación doctoral. No se debe priorizar el cumplimiento de parámetros directamente relacionados a aplicaciones de nivel industrial.
- Precisión del actuador: es importante poder contar con un desplazamiento suave y preciso, por lo que se le asigna un factor de ponderación del 25%. Se debe analizar qué configuración del actuador brinda una mayor precisión en el movimiento.
- Escalabilidad: este parámetro es esencial, por lo que tiene un peso importante en la selección del diseño. Representa un 25% de peso en la decisión final. La escalabilidad es

la posibilidad de conseguir un dispositivo base, para así lograr en un futuro la fabricación de una máquina de mayores dimensiones y con más capacidad de producción, que cumpla con altos estándares de calidad.

- **Accesibilidad:** tiene un porcentaje del 10% en la matriz de decisión. Indica la disponibilidad para conseguir las piezas del mecanismo en el país. Al tener accesibilidad a las piezas, se reducen costos de envío y por ende la propuesta estudiada puede ser más atractiva para el proyecto.

Tabla 5.4. Matriz de decisión de alternativa final. Fuente: Elaboración propia.

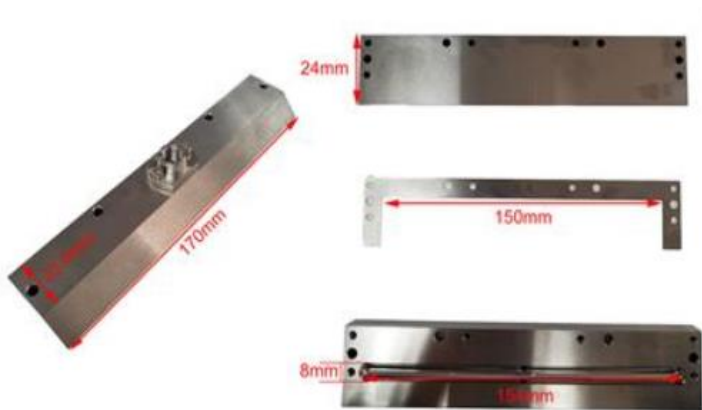
	Costo	Uso experimental	Precisión del actuador	Escalabilidad	Accesibilidad	Rango
Factor de ponderación	0,25	0,15	0,25	0,25	0,1	1
Alternativa 1.1	5 1,25	5 0,75	3 0,75	4 1	4 0,4	4,15
Alternativa 1.2	4 1	4 0,6	3 0,75	3 0,75	4 0,4	3,5
Alternativa 1.3	3 0,75	3 0,45	5 1,25	4 1	2 0,2	3,65

5.3. Comparativa con modelos existentes en el mercado

Como se ha descrito en secciones anteriores, existen diferentes empresas que se dedican a la fabricación de slot die coaters. Dentro de tales opciones se pueden encontrar dispositivos que son usados en aplicaciones de laboratorio y, también, para usos de índole industrial. Estos últimos pese a que poseen un gran tamaño, son exclusivos para sustratos flexibles.

La importancia de diseñar uno de estos dispositivos desde cero es sin duda alguna el ahorro económico, así como la posibilidad de escalar el diseño para su uso en escenarios más complejos. Asimismo, se debe recordar que a través del proyecto existe el potencial de lograr obtener datos de gran relevancia científica, los cuales marcarían un precedente en la fabricación de ventanas con recubrimientos termocrómicos.

Referente al tema económico, la empresa MTI Corporation, tiene la opción de que el cliente compre por aparte el cabezal (ver figura 5.8). Sin embargo, un cabezal de 150 mm de longitud (aproximadamente 50 mm menos que el diseñado en este proyecto), está muy por arriba del precio esperado para el mecanizado de la propuesta diseñada.



Sale Price: USD\$2,998.00

[If you are international, please click this.](#)

In stock

Item Number: SDH150SS

Product Options


Please select slot die head:

[Email this page to a friend](#)

Figura 5.8. Cabezal de empresa MTI Corporation (150 mm). Fuente: mtixtl.com

Por otro lado la empresa de equipo para laboratorios de nombre Ossila, vende un slot die coater para vidrios portaobjetos. Este se encuentra equipado con una bomba de jeringa, dos micrómetros digitales y dos indicadores de altura digitales (ver figura 5.9). Pese a que posee elementos de alta precisión, su precio es muy elevado (alrededor de \$5 300 000) comparado con el diseño de este proyecto y no cumple con las dimensiones especificadas por el cliente.

Slot-Die Coater

Manual 



Power Cord Type [?]

Type A (US)

Product Code **L2005A1-US**

In stock for priority dispatch

Price **\$7,800.00**

Qty.

1

\$ USD

Add to Cart / Quote

Figura 5.9. Slot die coater para laboratorio marca Ossila. Fuente: ossila.com

Por lo tanto, el producto que puede realmente compararse con alguno de los elementos diseñados es el cabezal es el mostrado en la figura 5.8, sin embargo, el Slot Die Coater de la figura 5.9 puede dar una idea del elevado precio que posee tal producto. De acuerdo a las cotizaciones (Anexo 1) se tiene la siguiente comparación:

Tabla 5.5. Comparación del precio del cabezal (producto diseñado vs producto encontrado en el mercado). Fuente: Elaboración propia.

Producto	Material	Longitud máxima de recubrimiento	Proveedor	Costo
Diseñado	Acero inoxidable	200 mm	MLWS	€ 334 000
Disponible en el mercado	Acero inoxidable	150 mm	MTI	€ 2 000 000 (aprox)

6. Diseño de la propuesta seleccionada

A continuación se discutirán los pasos realizados en el diseño del conjunto mecánico propuesto. Los planos estructurales se pueden observar en el Apéndice 5. En primera instancia se muestran los cálculos teóricos de cada uno de los elementos del cabezal y los actuadores lineales.

Además, en el Apéndice 4 se muestra la validación del diseño mecánico por medio de los resultados de las simulaciones. Asimismo, el resumen del costo de la propuesta se encuentra en la tabla 12.5 del Apéndice 2. Por último, la memoria de cálculo se presenta en el Apéndice 3, en esta se muestra a detalle todos los pasos realizados para llegar a los resultados mostrados en esta sección.

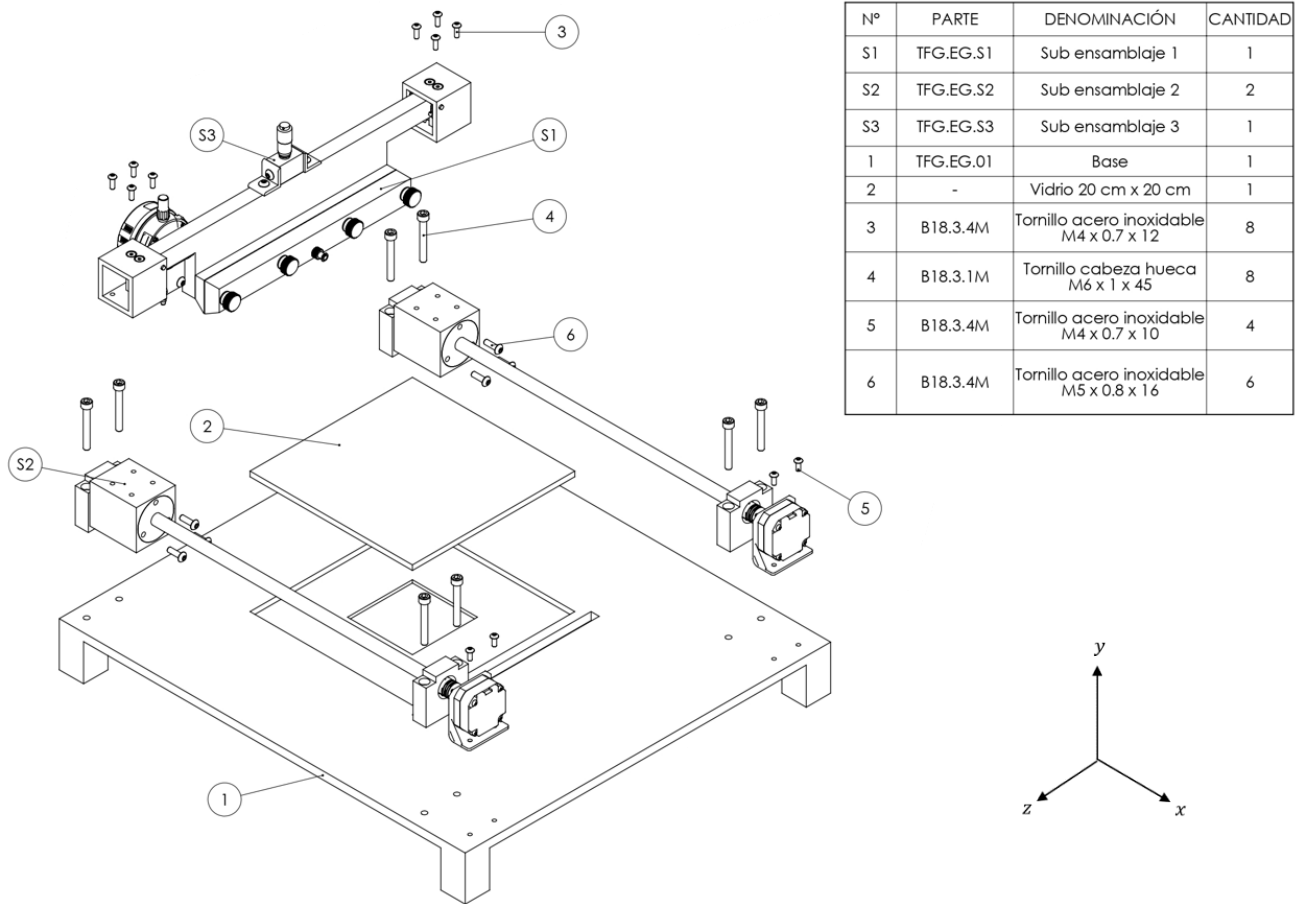


Figura 6.1. Ensamble final del diseño mecánico del dispositivo. Fuente: Elaboración propia.

6.1. Diseño del cabezal

6.1.1. Componentes del cabezal

Recordando lo descrito en secciones anteriores, es prudente que se tengan presentes aquellos valores que previamente se han definido e intervienen en la caracterización del recubrimiento. Estos datos se muestran desde la tabla 4.1 hasta la tabla 4.3.

En estas tablas se menciona que la sustancia con la que actualmente se trabaja posee una viscosidad en un rango de 0,015 Pas – 0,025 Pas a 25 °C, sin embargo, se estableció una viscosidad mucho mayor a estas. Esto ya que por indicaciones del cliente, se quiere contar con una máquina que sea capaz de manejar un rango mucho más amplio de viscosidades absolutas, en específico, 10 veces más que la viscosidad menor.

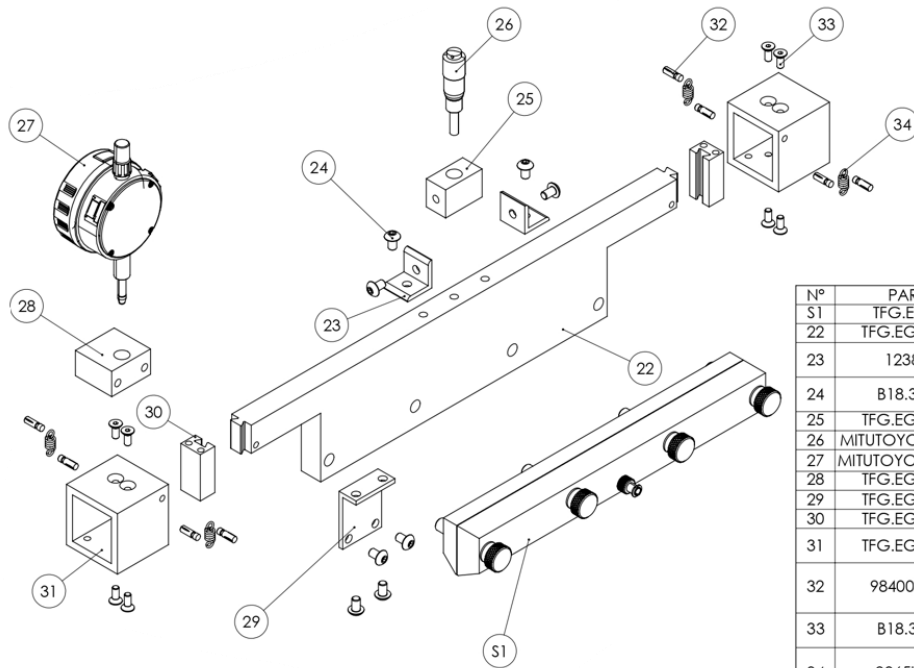
Se debe hacer hincapié en que para facilitar los cálculos del Slot Die Coater se utilizó el modelo de Navier Stokes para averiguar el perfil de velocidad del fluido. Este método genera resultados aproximados que son aceptables para la fase en la que se encuentra el diseño y la investigación asociada al mismo. Existen modelos mucho más complejos que logran una mayor precisión en los cálculos y a su vez permiten modelar ciertos comportamientos de la película para optimizar la uniformidad de esta, esto por medio del análisis 3D del fluido. Empero, dichos modelos se salen de las posibilidades del presente proyecto.

El mecanismo de toda la estructura del cabezal, esta conformado por las siguientes partes (estas se pueden observar a detalle en el apéndice 5):

Tabla 6.1. Elementos que conforman al mecanismo del cabezal. Fuente: Elaboración propia.

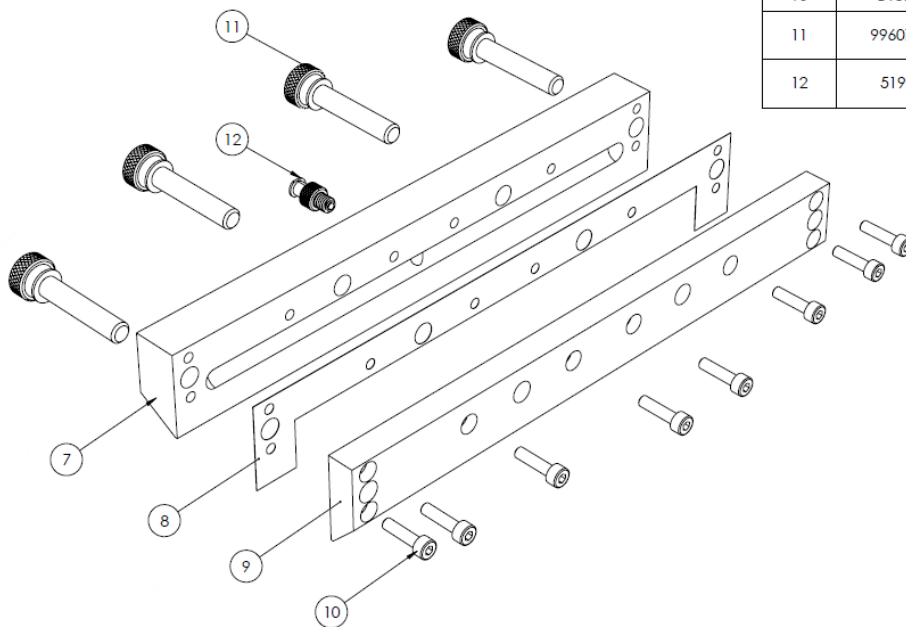
Componente	Total de piezas
Soporte de Slot Die Coater	1
Pin de sujeción de resorte	8
Resortes	4
Soporte del cabezal	2
Matriz ranurada	1
Separador	1
Matriz sin ranura	1
Tornillo micrométrico	1
Indicador de altura	1
Escuadras 90° para unión	4
Tornillos moleteados	4
Tornillos Allen cónicos	8
Guía del soporte de Slot Die Coater	1
Tornillos cabeza plana	8
Tornillos cabeza redonda	8
Soporte del indicador	1
Soporte del tornillo micrométrico	1

Por medio del ensamble realizado con el software SolidWorks, se pudo obtener la masa total de esta estructura, la cual es de 3 kg. Esta masa estará soportada por dos actuadores, los cuales harán el movimiento de la estructura del cabezal, por lo que dicho valor es esencial para el cálculo de los ejes de cada uno de los actuadores. Sin embargo, esto se discutirá en la siguiente sección, por ahora solo nos enfocaremos en la estructura del cabezal. El ensamble que contempla los componentes listados en la tabla 6.1, se muestra en la siguiente imagen.



Nº	PARTE	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
S1	TFG.EG.S1	Sub ensamble 1	1
22	TFG.EG.S3.01	Soporte del cabezal	1
23	123819	Unión 90° 20mm x 20 mm (Novex)	2
24	B18.3.4M	Tornillo acero inoxidable M5 x 0.8 x 8	8
25	TFG.EG.S3.02	Soporte micrómetro	1
26	MITUTOYO 148-111	Tornillo micrométrico	1
27	MITUTOYO 543-302	Indicador de altura	1
28	TFG.EG.S3.03	Soporte indicador	1
29	TFG.EG.S3.04	Escuadra de unión	1
30	TFG.EG.S3.05	Guía del cabezal	2
31	TFG.EG.S3.06	Conexión cabezal-actuador	2
32	98400A365	Pin sujetador de resorte (McMaster-Carr)	4
33	B18.3.5M	Tornillo cabeza plana M4 x 0.7 x10	8
34	9065K585	Resorte de acero inoxidable (McMaster-Carr)	4

Figura 6.2. Ensamble de la estructura que posee al cabezal. Fuente: Elaboración propia.



Nº	PARTE	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
7	TFG.EG.S1.01	Matriz con manifold	1
8	TFG.EG.S1.02	Separador	1
9	TFG.EG.S1.03	Matriz sin manifold	1
10	B18.3.1M	Tornillo cabeza hueca M4 x 0.7 x 16	8
11	99607A317	Tornillo moleteado M8 x 1.25 x 40 (McMaster- Carr)	4
12	5194K22	Acople para tubo M6 x 1 x 6.35 (McMaster- Carr)	1

Figura 6.3. Vista explosionada del sub ensamble "S1" (slot die head). Fuente: Elaboración propia.

6.1.2. Parámetros específicos del funcionamiento del cabezal

Es importante destacar que en esta sección, se realiza el diseño del sub ensamblaje 1, el cual corresponde al *slot die head* (enumerado como S1 en los planos). Para iniciar con tal diseño se debe utilizar la ecuación 5, con esta se obtiene un valor de caudal que depende de la longitud del cabezal, la velocidad del mismo y el espesor de la película húmeda.

Se debe resaltar que este espesor no es el espesor final (espesor seco). Para llegar a obtener el espesor seco se debe implementar la ecuación 12, por lo que de primera mano se debe conocer el espesor húmedo.

Es importante dar a conocer que el objetivo de la investigación doctoral de la profesora e investigadora M.Sc. Natalia Murillo, es seguir haciendo mejoras al presente diseño para así poder en un futuro fabricar ventanas a nivel industrial. Por lo que los cálculos aquí presentados son solamente un punto de partida para poder dimensionar el Slot Die Coater.

Además, se pretende añadir a la estructura aquí diseñada, otros mecanismos que ayuden a generar un espesor de película dentro de los rangos ya mencionados. Como por ejemplo, un sistema que genere vacío cuando se cubra el vidrio recubierto con otra superficie del mismo material, también, un sistema de curado UV (este proceso además de ayudar a la conservación de las propiedades termocrómicas, colabora a la disminución del espesor de la película).

Teniendo en consideración lo anterior, la siguiente figura (duplicada de la figura 3.9 del marco teórico) muestra cada uno de los parámetros considerados en el diseño del slot die head.

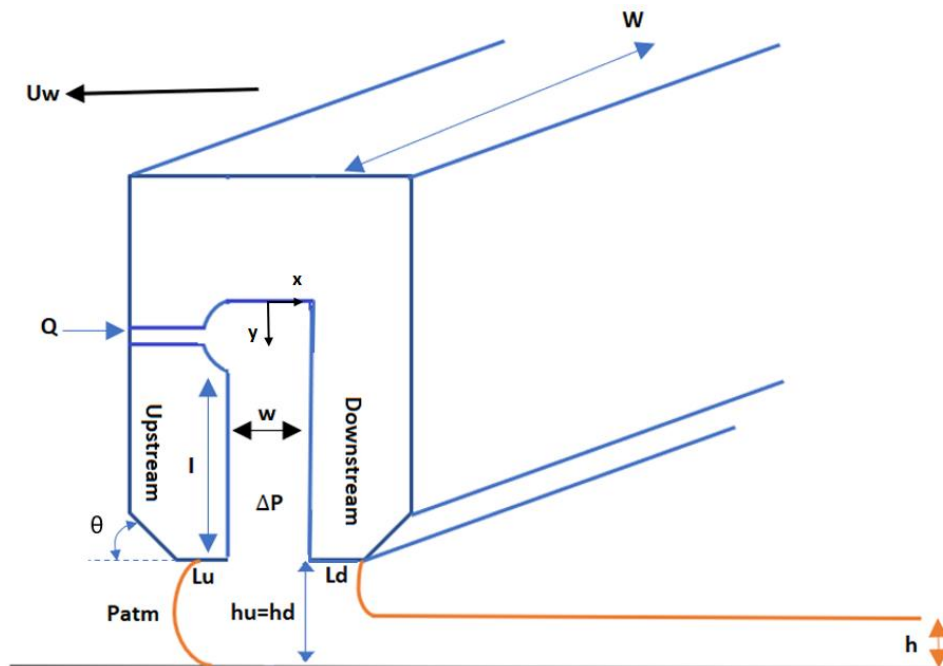


Figura 6.4. Dimensiones del cabezal (repetición de figura 3.9). Fuente: Elaboración propia.

El caudal con el que se trabajará inicialmente (sin considerar la viscosidad absoluta de la sustancia), es igual a:

$$Q = WU_w h$$

$$Q = (0,025 \text{ m/s})(0,2 \text{ m})(1 \times 10^{-7} \text{ m})$$

$$Q = 5 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0,03 \text{ ml/min}$$

De acuerdo a lo investigado, los slot die coaters casi siempre presentan separadores con espesores al nivel de micrómetros. Los más delgados van desde los 100 μm . Además, entre menor sea el espesor del separador, menor será el grosor de la película húmeda. (Kim, Shin, Lee & Park, 2019; Stobo, 2017)

Por medio de las cotizaciones realizadas se pudo observar que los separadores en acero inoxidable con esta dimensión son muy costosos. Por lo que se procedió a realizar los cálculos

respecto a las condiciones de la cotización más favorable, la cual fue cuando el separador presenta un espesor $w = 0,15 \text{ mm}$.

De esta forma se obtiene el siguiente cambio de presión dentro de la estructura del cabezal:

$$\Delta P = \frac{12\eta IQ}{w^3 W}$$

$$\Delta P_{min} = \frac{12(0,015 \text{ Pas})(0,012 \text{ m})(5 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s})}{(0,00015 \text{ m})^3 (0,2 \text{ m})}$$

$$\Delta P_{min} = 1,6 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{max} = \frac{12(0,17 \text{ Pas})(0,012 \text{ m})(5 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s})}{(0,00015 \text{ m})^3 (0,2 \text{ m})}$$

$$\Delta P_{max} = 18,133 \text{ Pa}$$

Se puede observar que el cambio de presión dentro de la estructura del slot die head es proporcional a su viscosidad, por lo que a mayor viscosidad mayor será el valor de ΔP . Esto se muestra en la siguiente figura, donde se puede apreciar el comportamiento lineal que existe entre estos dos factores.

La distancia $I = 0,012 \text{ m}$ se encuentra en los planos constructivos, es la resultante de condicionar al cabezal a los ángulos de la cuchilla del cabezal a los valores de 30° y 45° , además de seguir las recomendaciones de distinta bibliografía sobre el dimensionamiento del manifold o cavidad de entrada (elemento que cuenta con 8mm de diámetro). La distancia I es aquella que existe desde el borde del manifold hasta el borde de la cuchilla. La dimensión L_d se estableció de la misma forma, su valor es $1 \times 10^{-3} \text{ m}$. Esta distancia es la longitud que poseen las cuchillas del cabezal, cabe destacar que L_d hace referencia a la cuchilla que se encuentra en la región aguas abajo. Por otro lado la dimensión L_u (longitud de la cuchilla aguas arriba) es igual a L_d .

Al calcular $V(x)$ para cada uno de los límites del rango de viscosidad (0,015 Pas y 0,17 Pas), que es el perfil de velocidad que existe en la distancia que hay entre las dos matrices (con ranura y sin ranura), es decir, el espesor del separador, se obtienen los siguientes valores (esto por medio de la ecuación 9):

$$V(x) = \frac{1}{2\eta} \left(-\frac{P_{atm} - \Delta P}{L} \right) (x^2 - H^2)$$

$$V(x) @ 0,015 \text{ Pas} = \frac{1}{2 \times 0,015 \text{ Pas}} \left(-\frac{101\,400 \text{ Pa} - 1,6 \text{ Pa}}{1 \times 10^{-3} \text{ m}} \right) (0^2 - (7,5 \times 10^{-5} \text{ m})^2)$$

$$V(x) @ 0,015 \text{ Pas} = 19,012 \text{ m/s}$$

$$V(x) @ 0,17 \text{ Pas} = \frac{1}{2 \times 0,17 \text{ Pas}} \left(-\frac{101\,400 \text{ Pa} - 18,133 \text{ Pa}}{1 \times 10^{-3} \text{ m}} \right) (0^2 - (7,5 \times 10^{-5} \text{ m})^2)$$

$$V(x) @ 0,17 \text{ Pas} = 1,677 \text{ m/s}$$

Por ende, el comportamiento del perfil de velocidad respecto a la viscosidad absoluta de la sustancia es inversamente proporcional. Esto se puede apreciar en la siguiente gráfica.

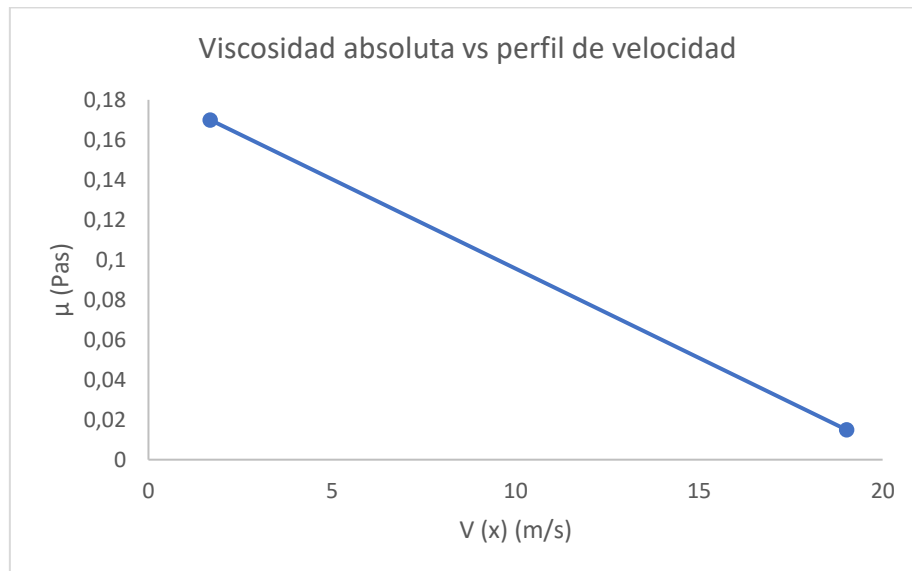


Figura 6.5. Viscosidad absoluta en relación al perfil de velocidad en el cabezal. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se resumen los datos utilizados para los cálculos de los perfiles de velocidad. Se debe destacar que en el diseño realizado para el slot die head, se tienen fijos los datos del espesor del separador y de la velocidad lineal (valor máximo de 25 mm/s). Además, de acuerdo a la figura 3.9, los valores de “x” y “H” deben ser evaluados en 0 y $7,5 \times 10^{-5}$ m, respectivamente. Esto con el fin de obtener el valor más alto posible de velocidad dentro del cabezal.

Tabla 6.2. Resultados para el perfil de velocidad $V(x)$ de acuerdo a los datos evaluados. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Valor
x	0 m
H (w/2)	$7,5 \times 10^{-5}$ m
P_{atm} (Cartago)	101 400 Pa
L_d	1×10^{-3} m
V(x) con 0,015 Pas	19,012 m/s
V(x) con 0,17 Pas	1,677 m/s

Posterior a esto, al despejar Q' de las ecuaciones 10 y 11 presentadas en el marco teórico, e igualar estos resultados, se obtiene lo siguiente:

$$U_w = \frac{2Q'}{h_d}$$

$$h_{húmeda} = \frac{2Q'}{V(x)}$$

$$\frac{U_w h_d}{2} = \frac{V(x) h_{húmeda}}{2}$$

$$U_w h_d = V(x) h_{húmeda}$$

$$h_d = \frac{h_{húmeda} V(x)}{U_w} \quad (24)$$

Por ende, al averiguar el valor de h_d (ver figura 6.4), que es la distancia que existe desde las cuchillas hasta el sustrato y a su vez es igual a h_u , se obtienen los siguientes resultados para cada valor de limite del rango de viscosidad (asumiendo que el espesor de la película húmeda es

de 100 nm). Estos parámetros son los más importantes dentro del diseño. Las demás dimensiones que en este apartado no fueron mencionadas, se especifican en el apéndice de planos.

Cabe destacar que algunas de ellas se seleccionaron por medio del sustento de diferentes artículos científicos. También, aunque las distancias h_d son muy pequeñas, estas pueden ser medibles con los instrumentos seleccionados para el mecanismo. A su vez, la tolerancia de planicidad que se indica para la base de hierro fundido (elemento con el que se calibra el indicador de altura MITUTOYO 543-302) es de $\pm 2 \mu m$, por lo que con los resultados obtenidos se puede garantizar un espesor de película húmeda dentro de los rangos calculados.

$$h_d @ 0,015 Pas = \frac{(1 \times 10^{-7} m)(19,012 m/s)}{(0,025 m/s)}$$
$$h_d @ 0,015 Pas = 7,605 \times 10^{-5} m$$

Como se puede observar, para una viscosidad de 0,015 Pas (15 cps), se obtiene un valor h_d de $7,605 \times 10^{-5} m$, es decir, $76,05 \mu m$. Como ya se mencionó, este valor puede medirse con el indicador de altura seleccionado. Es importante notar que con la viscosidad menor del rango con el que se está trabajando, se genera un valor de h_d mayor. Esto queda más claro en los siguientes resultados, donde se repitió el proceso ya descrito.

$$h_d @ 0,17 Pas = \frac{(1 \times 10^{-7} m)(1,677 m/s)}{(0,025 m/s)}$$
$$h_d @ 0,17 Pas = 6,708 \times 10^{-6} m$$

Para la viscosidad de 0,17 Pas (170 cps) se obtiene un valor h_d de $6,708 \times 10^{-6} m$, es decir, $6,708 \mu m$. Pese a ser un valor muy pequeño es igualmente medible de acuerdo al indicador marca MITUTOYO modelo 543-302. Por lo tanto, se puede asegurar que a mayor viscosidad menor será la distancia desde las cuchillas del cabezal al sustrato. Esto es importante

a la hora de la experimentación necesaria para el proyecto doctoral, ya que si se utilizan valores fuera del rango se debe reconsiderar las dimensiones y geometría del cabezal.

También, como ya se mencionó, estos valores indican un punto de partida para iniciar con la experimentación, por lo que será esencial simular la geometría aquí presentada con herramientas más especializadas, esto queda como un punto de mejora al dispositivo diseñado, ya que dicha simulación se sale del alcance de los objetivos presentados en este proyecto.

Tabla 6.3. Resultados para h_d según la viscosidad. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Valor
h_d con 0,015 Pas	$7,605 \times 10^{-5} m$
h_d con 0,17 Pas	$6,708 \times 10^{-6} m$

6.2. Diseño los actuadores lineales

Para lograr mover el cabezal a través de toda la superficie del vidrio a recubrir, se deben implementar dos actuadores lineales a cada lado de la estructura. Los elementos que componen a dichos actuadores se muestran en la siguiente tabla. Cabe resaltar que esta sección y las posteriores, abarcarán a detalle la selección y los cálculos para cada uno de los elementos citados a continuación.

Tabla 6.4. Componentes para cada actuador (2 actuadores en total). Fuente: Elaboración propia.

Cantidad	Componente	Total de piezas
1	Eje	2
2	Rodamientos rígidos de bolas	4
2	Anillos de retención	4
2	Carcasas de los rodamientos	4
1	Motores NEMA 17	2
1	Acoples de los motores	2
1	Soportes de los motores	2
1	Tuerca precargada	2
1	Carcasa para la tuerca	2
4	Tornillos de fijación para rodamiento	8
3	Tornillos de fijación de la carcasa de la tuerca	6

La distancia por la cual se moverá la tuerca que soporta toda la estructura del Slot Die Coater es de 40 cm. Esto ya que el motor tendrá un tiempo de aceleración/ desaceleración y a velocidad constante, por lo que se debe dejar un rango de distancia a cada lado de la longitud del vidrio. El ensamble del actuador se muestra en la siguiente figura.

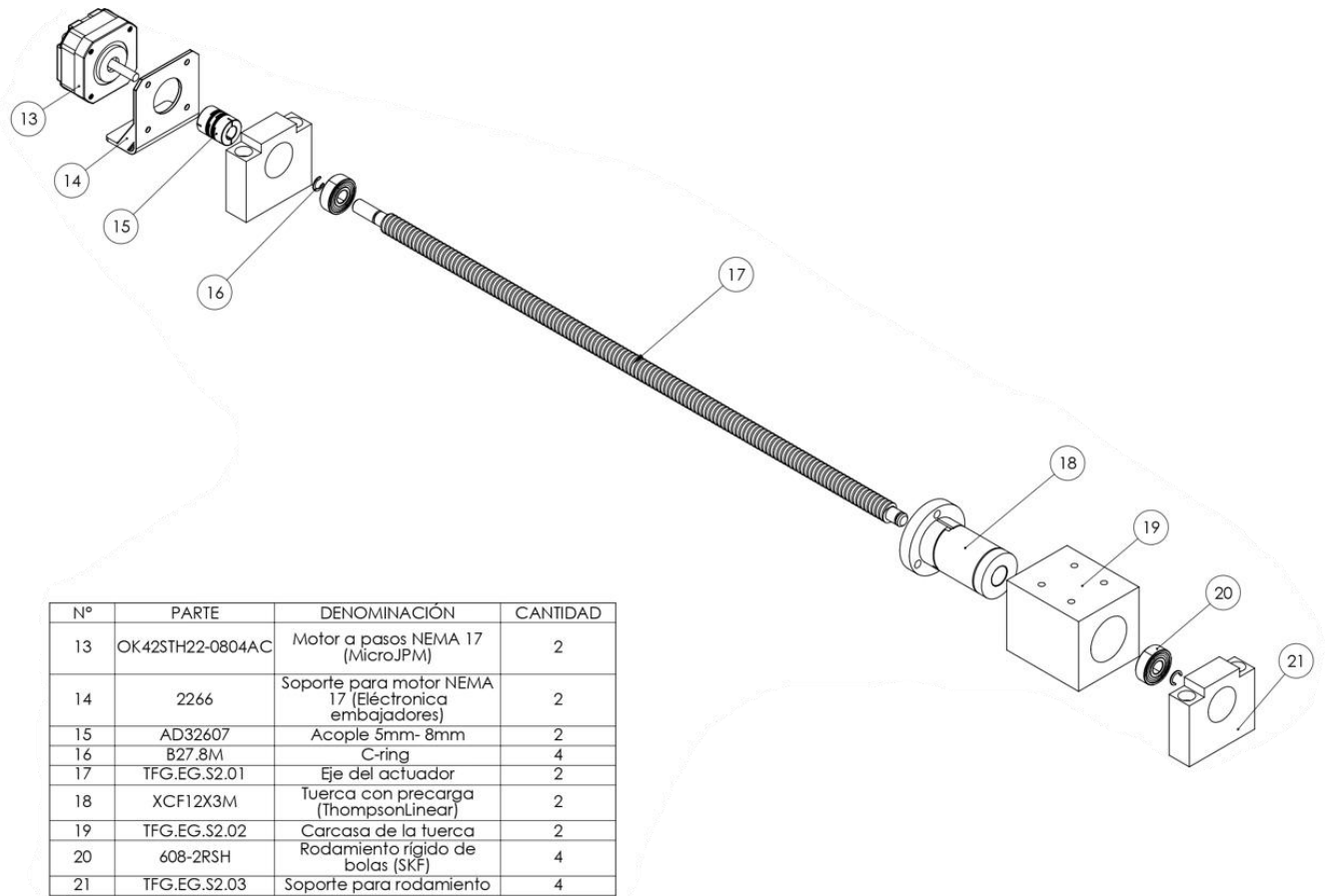


Figura 6.6. Ensamble del actuador. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta estos aspectos, se procede a exponer cada uno de los pasos para calcular los elementos ya mencionados.

6.2.1. Diseño de los ejes (Análisis estático)

Cada actuador cuenta con un eje. A este se le debe mecanizar la longitud ya mencionada con una varilla roscada externa. Esta sirve para que se pueda llevar a cabo el desplazamiento de la tuerca que soportará toda la estructura del cabezal. También, se debe contemplar que a cada

extremo del eje se deberá colocar un rodamiento. En uno de los extremos deberá posicionarse el acople del motor. El eje se encuentra con el número “17” en los planos constructivos, para tener una mejor idea de la geometría del mismo, a continuación se muestra una figura con el mismo:

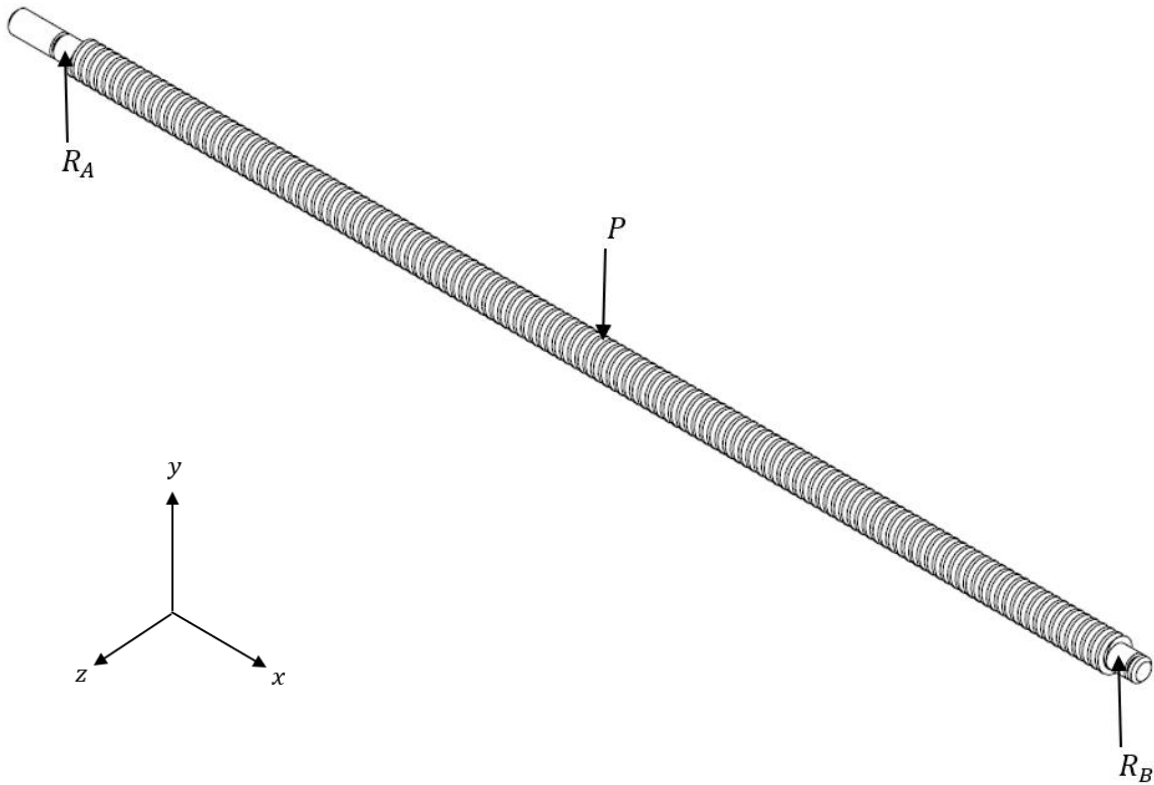


Figura 6.7. Isométrico del eje diseñado con sus respectivas cargas y reacciones. Fuente: Elaboración propia.

Para la determinación de las dimensiones del eje del actuador lineal se debió tomar en cuenta el valor necesario del torque para desplazar de un lado al otro a la tuerca que soporta toda la estructura del cabezal. Por ende, lo primero que se debe calcular es la carga que soporta cada eje.

La masa de toda la estructura del cabezal es de 3 kg, según lo mostrado en la tabla 6.1. Ya que se tienen dos ejes y el peso se distribuye entre los dos, se tiene:

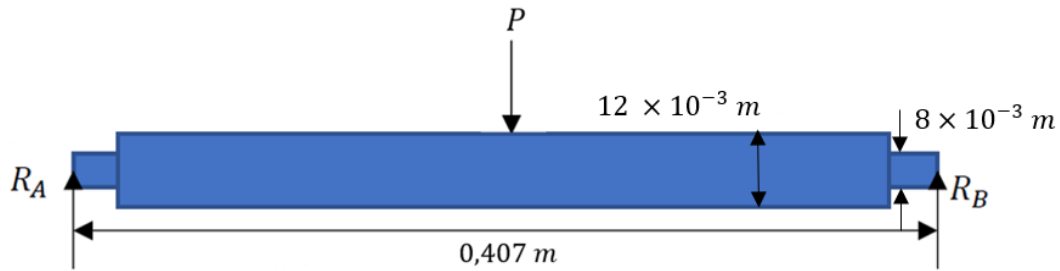


Figura 6.8. Diagrama de cuerpo libre del eje. Fuente: Elaboración propia.

$$P = \frac{3 \text{ kg}}{2} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$P = 14,715 \text{ N}$$

De acuerdo al diagrama de cuerpo libre anterior, se puede asegurar que el valor del momento crítico del mismo es:

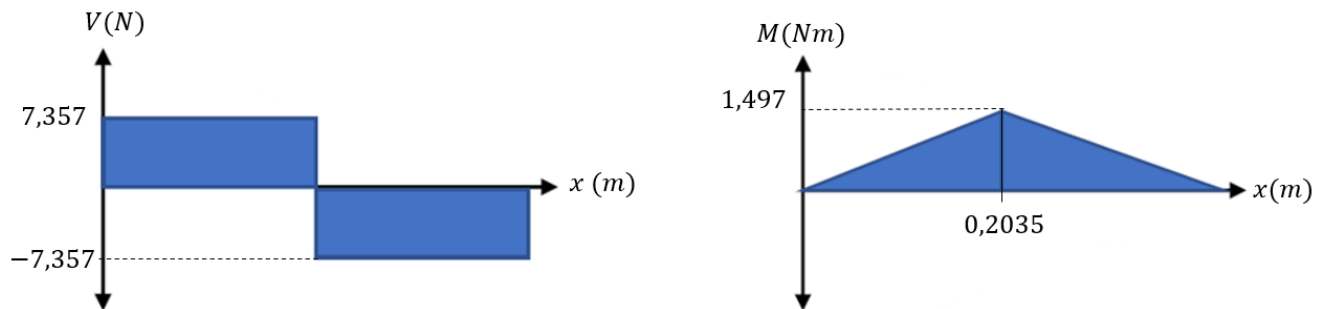


Figura 6.9. Diagramas de fuerza cortante y momento flector para la varilla roscada. Fuente: Elaboración propia.

$$M = 1,497 \text{ Nm}$$

El material de la varilla es el acero inoxidable. El cual posee un $\tau_{max} = 568 \text{ MPa}$ y $S_y = 215 \text{ MPa}$. Estas características son importantes para los siguientes cálculos a realizar. Con los datos anteriores se puede averiguar el valor mínimo del diámetro nominal de la varilla roscada, el cual es:

$$d = 2 \times C \quad (32)$$

$$C = \sqrt[3]{\frac{M}{\frac{\pi}{2}\tau_{max}}} \quad (33)$$

$$C = 1,2261 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 2,452 \times 10^{-3} \text{ m} = 2,452 \text{ mm}$$

Pero, es importante destacar que para los ejes es necesario tener un factor de seguridad de 3 a 5, por ende, el diámetro mayor de la tuerca debe ser de:

$$d_{nominal} = 12 \text{ mm}$$

$$FS = \frac{12 \text{ mm}}{2,452 \text{ mm}} \approx 5$$

Teniendo esto en consideración, se eligió una varilla roscada de perfil trapezoidal T12, con las siguientes dimensiones:

Tabla 6.5. Dimensiones de la varilla roscada T12 posicionada en el eje. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Símbolo	Valor
Diámetro promedio	dp	10,415 mm
Diámetro menor	dr	8,5 mm
Diámetro medio del collarín	dc	15 mm
Avance	L	3 mm
Ángulo de la cuerda	α	15 °
Paso	p	3 mm

Es importante averiguar los coeficientes de fricción del rodamiento con el eje y de la tuerca con la varilla roscada. Este paso es importante ya que se decidió que el actuador lineal funcione con una tuerca con precarga, esto hará que el ajuste entre la tuerca y el segmento roscado del eje sea más preciso. Lo anterior hace que el movimiento a su vez sea más suave y con un nivel mayor de precisión. Por ende, los factores de fricción, necesarios para los siguientes cálculos, son los siguientes:

Tabla 6.6. Coeficientes de fricción en el eje. Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Símbolo	Valor
Rodamiento	μ_c	0,09
Tuerca	μ	0,1

Contando con la información anterior se puede proceder a calcular los torques necesarios para el desplazamiento de la carga que soporta cada eje. Por medio de las ecuaciones 21 y 22, se obtienen los siguientes resultados:

$$T_u = 0,025 Nm$$

$$T_d = 0,011 Nm$$

Se deben calcular los esfuerzos críticos. Cuando existe una varilla roscada en juego con una tuerca, se puede estimar que los mismos se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$T_{yz} = \frac{16T_r}{\pi d_r^3} \quad (34)$$

$$\sigma_y = \frac{-4F}{\pi d_r^2} \quad (35)$$

$$\sigma_x = \frac{6F}{\pi d_r p n_t} = \frac{6 \times (0,38F)}{\pi d_r p} \quad (36)$$

$$T_{zx} = \frac{-4T_r}{\pi d_r^2 p n_t} = \frac{-4(0,38T_r)}{\pi d_r^2 p} \quad (37)$$

Si se observan las ecuaciones anteriores, se puede inferir que en un mecanismo de este tipo el movimiento que se da entre el eje y la tuerca provoca que la distribución de la carga no sea uniforme en la rosca. Es decir, en este tipo de configuraciones, el esfuerzo crítico se genera en la primer rosca, la cual soporta un 38% de la carga. Cabe destacar que junto con esta aproximación, se estima que la segunda rosca soporta un 25% mientras que la tercera un 15%. Sin embargo, como ya se mencionó, para los cálculos nos interesa solamente el esfuerzo en la primer rosca. Los valores de cada uno de los esfuerzos son:

Tabla 6.7. Esfuerzos críticos de la varilla roscada. Fuente: Elaboración propia.

Esfuerzo	Pa	MPa
T_{yz}	207616	0,208
σ_y	-259318	-0,259
σ_x	418798	0,419
T_{zx}	-55883	-0,056

Por lo tanto, la tensión por Von Mises, usando la ecuación 18, da como resultado:

Tabla 6.8. Esfuerzo por Von Mises de la varilla roscada. Fuente: Elaboración propia.

σ_e	Pa	MPa
	699944	0,700

Nuevamente, tomando en cuenta las propiedades del material, el diseño cuenta con un factor de seguridad igual a:

Sy (Yield strength)	215 MPa
SF	307,143

Esto indica que las dimensiones de la varilla roscada son apropiadas para soportar la carga del cabezal. Como los dos actuadores necesarios en el mecanismo son exactamente iguales, no es necesario volver a calcular lo ya desarrollado.

6.2.2. Diseño de los ejes (Análisis de fatiga)

En la sección anterior se mencionó una de las propiedades del material del eje (el esfuerzo a fluencia), este dato también será necesario en los próximos cálculos. Por ende, en la tabla a continuación, se muestran esta y el esfuerzo último de tensión, otra propiedad importante.

Tabla 6.9. Propiedades mecánicas del eje de material AISI 304. Fuente: Elaboración propia.

Propiedad	Valor (MPa)	Valor (kpsi)
S_y	215	31
S_{ut}	517	75

En este caso se debe calcular un factor de seguridad de acuerdo a la ecuación ED-Goodman. A través de este se puede asegurar si el eje soportará la carga aplicada cuando el mismo se encuentre en movimiento. De acuerdo a lo descrito en el capítulo 3, los resultados para cada uno de los parámetros necesarios en el análisis de fatiga se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6.10. Cálculos para el análisis a fatiga. Fuente: Elaboración propia.

Valor	Nº de ecuación	Resultado	Desarrollo
S_e	22	212,712 MPa	$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e'$
S_e'	23	258,5 MPa	$S_e' = 0,5 S_{ut}$
k_a	24	0,861	$k_a = a S_{ut}^b$
k_b	25	1,99	$k_b = 1,24 d^{-0,107}$

Los valores seleccionados son los siguientes:

- Factor de superficie k_a .

Como ya se mencionó, este factor esta dado por:

$$k_a = a S_{ut}^b$$

Donde el valor de los factores a y b son igual a 4,51 y -0,265. Esto de acuerdo a la información proporcionada en la siguiente figura.

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} , kpsi	S_{ut} , MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Figura 6.10. Factores a y b para el cálculo del factor de superficie. Fuente: (Budynas & Nisbett, 2018)

Por ende:

$$k_a = 0,861$$

- Factor de tamaño k_b .

Este se encuentra relacionado con el diámetro nominal del eje. De acuerdo a la figura 6.8, es en el punto medio del eje, donde se da un momento de flexión mayor, por lo que esta

ubicación es crítica. Si bien existe un cambio de diámetro, donde hay una mayor concentración de esfuerzos justo en la unión del diámetro de 8 mm con el de 12 mm, en este punto el valor del momento es muy bajo. Por lo anterior, y habiendo comprobado lo descrito, los cálculos estarán relacionados al punto medio del eje. Así:

$$k_b = 1,24d^{-0,107}$$

Donde d es igual a 12 mm = 0,012 m. Por lo tanto:

$$k_b = 1,99$$

- Factor de carga k_c .

De acuerdo a las especificaciones de Budynas & Nisbett (2018), el valor de k_c es igual a 0,59 para el caso donde la carga de torsión es la que predomina. Esto se cumple en el elemento que se está estudiando, así que el valor ya mencionado es el utilizado. Esto de según la siguiente figura:

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión} \end{cases}$$

Figura 6.11. Valor de k_c . Fuente: (Budynas & Nisbett,2018)

- Factor de temperatura k_d .

Para este caso el factor k_d toma un valor de 1. Esto ya que no se presentan cambios bruscos de temperatura.

- Factor de confiabilidad k_e .

De acuerdo a la bibliografía, se tiene que k_e es igual a 0,814. Esto se muestra en la siguiente figura.

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814

Figura 6.12. Factor k_e para un 99% de confiabilidad. Fuente: (Budynas & Nisbett, 2018)

- Factor de corrección k_f .

El factor k_f toma un valor de 1. Esto ya que no se presentan cambios bruscos en las condiciones en las que trabaja el eje. Cabe destacar que se asumirá que $k_f = k_{fs}$, esto para el cálculo del factor de seguridad.

De acuerdo a lo anterior, se obtuvo el siguiente valor de factor de seguridad, también calculado según lo establecido en el marco teórico (capítulo 3).

Tabla 6.11. Cálculos para el análisis a fatiga. Fuente: Elaboración propia.

Valor	Nº de ecuación	Resultado	Desarrollo
$\frac{1}{n}$	21	0,042	$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left[\frac{1}{S_e} (4(k_f M_a)^2 + 3(k_{fs} T_a)^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} (4(k_f M_m)^2 + 3(k_{fs} T_m)^2)^{\frac{1}{2}} \right]$
n	-	23,809	Inverso de la anterior

Según los cálculos realizados en la sección anterior (análisis estático), se cuenta con un torque máximo de 0,025 Nm y un momento flector de 1,497 Nm. Por ende, el resultado de la tabla 6.12 a detalle es el siguiente:

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi(0,012)^3} \left[\frac{1}{212,712 \times 10^6 \text{ Pa}} (4(1,497 \text{ Nm})^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{517 \times 10^6 \text{ Pa}} (3(0,025 \text{ Nm})^2)^{\frac{1}{2}} \right]$$

$$\frac{1}{n} = 0,042$$

$$n = FS = 23,809$$

Como se puede observar el factor de seguridad es mayor a 2, por ende, el eje posee vida infinita y bajo las cargas mencionadas no tendrá fallas. Por otro lado, se debe verificar que no existan fallas respecto al límite de fluencia. En este caso en particular, se cuenta con que el esfuerzo por flexión es completamente inverso, este toma el siguiente valor:

$$\sigma_{rev} = \frac{Mc}{I} = \frac{1,497 \text{ Nm} \times \frac{0,012\text{m}}{2}}{\frac{\pi}{64} \times (0,012\text{m})^4}$$

$$\sigma_{rev} = 8824257 \text{ Pa} = 8,824 \text{ MPa}$$

$$\% \text{ respecto a } S_y = \frac{8,824 \text{ MPa}}{215 \text{ MPa}} \times 100\% = 4,104\%$$

Como se puede observar este resultado está muy por debajo del límite elástico S_y , ya que representa solamente un 4,104% del mismo. Por ende, se puede asegurar que no existirá falla en este ámbito.

6.2.3. Selección de motores y sus acoples

Antes de seleccionar los motores es importante tener en cuenta los siguientes valores:

Tabla 6.12. Parámetros que ayudan a seleccionar a los motores. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Valor
Velocidad máxima (U_w)	0,025 m/s
Masa total (m)	3 kg
Eficiencia del actuador (n)	28,1%
Coefficiente de fricción (μ)	0,1
Diámetro nominal de la varilla roscada (d_n)	12 mm
Longitud entre cojinetes (l)	400 mm
Avance por revolución (L)	3 mm/rev
Densidad de la varilla (ρ)	7900 kg/m ³

Lo primero a tener en cuenta es el cálculo de la eficiencia del actuador, este se determina por medio de la potencia de salida entre la potencia necesaria para generar el desplazamiento de la tuerca. Es decir:

$$n = \frac{P_{out}}{P_u} = \frac{P \times U_w}{T_u \times V} = \frac{[N] \times [m/s]}{[Nm] \times [rad/s]} \quad (31)$$

$$n = \frac{(14,715 N)(0,025 m/s)}{(0,025 Nm)(0,025 m/s \times \frac{1}{3 \times 10^{-3} m/rev} \times 2\pi)} = 0,281$$

$$n = 28,1 \%$$

Luego, se debe considerar el tipo de motor a utilizar de acuerdo a la aplicaciones del mecanismo o los mecanismos. Para este caso, el motor a pasos funciona muy bien. Por ende, se procede a hacer los pasos pertinentes para lograr averiguar qué motor puede utilizarse en la máquina.

Se deben calcular las inercias, tanto la de la varilla como la de la tuerca. Estas dos se suman para obtener la inercia total respecto a la carga que se soporta en la estructura del actuador. De esta forma, se obtiene:

$$J_B = \frac{\pi}{32} \times \rho \times l \times (d_n)^4 \quad (38)$$

$$J_B = \frac{\pi}{32} \times 7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,4 m \times (0,012 m)^4$$

$$J_B = 6,433 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

$$J_m = \left(\frac{L}{2\pi}\right)^2 \times m \quad (39)$$

$$J_m = \left(\frac{0,003m}{2\pi}\right)^2 \times 3 \text{ kg}$$

$$J_m = 6,839 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$$

$$J_{Total} = J_m + J_B \quad (40)$$

$$J_{Total} = 7,117 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

Además, para obtener el valor de torque, se debe calcular del peso en operación y en condición de precarga. A partir de las siguientes ecuaciones del capítulo 3, se tiene:

$$F_{operación} = m \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times (\text{sen}\beta + \text{cos}\beta \times \mu)$$

$$F_{operación} = 3 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times (\text{sen}(0) + \text{cos}(0) \times 0,1) = 2,943 \text{ N}$$

$$F_{precarga} = \frac{F_{operación}}{3} = 0,981 \text{ N} \quad (41)$$

Donde el torque está dado por:

$$T_L = \frac{F_{operación} \times L}{2\pi \times n} + \frac{\mu \times F_{precarga} \times L}{2\pi}$$

$$T_L = \frac{2,943 \text{ N} \times 0,003 \text{ m/rev}}{2\pi \times 28,06\%} + \frac{0,1 \times 0,981 \text{ N} \times 0,003 \text{ m/rev}}{2\pi}$$

$$T_L = 0,005 \text{ Nm}$$

Por otro lado, las revoluciones por minuto a las que el motor debe someterse son las siguientes:

$$RPM = \frac{60 \times U_w}{L} \quad (42)$$

$$RPM = 60 \frac{s}{min} \times \frac{0,025 \frac{m}{s}}{0,003 \text{ m/rev}} = 500 \text{ rev/min}$$

El radio de inercia y los tiempos de aceleración, desaceleración y a velocidad constante se calculan en seguida. Esto ya que estos valores son de especial importancia para lograr un recubrimiento uniforme, así como para calcular el torque de aceleración y desaceleración. Así, dichos valores son los siguientes:

$$t_{total} = \frac{l}{U_w} \quad (43)$$

$$t_{total} = \frac{0,4 \text{ m}}{0,025 \text{ m/s}} = 16 \text{ s}$$

$$t_{aceleración} = 25\% \times t_{total} \quad (44)$$

$$t_{aceleración} = 25\% \times 16 \text{ s} = 4 \text{ s}$$

$$t_{desaceleración} = t_{aceleración} = 4 \text{ s}$$

$$\text{Radio de inercia} = \frac{J_{total}}{J_o} = \frac{7,117 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2}{1,5 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2} = 4,745 \approx 5 \text{ (es el valor esperado)} \quad (45)$$

Donde J_o corresponde a la inercia del rotor ($1,5 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$), ver figura 6.2. A su vez el torque necesario para la aceleración y desaceleración del motor, se define como (de acuerdo al capítulo 3):

$$T_a = T_d = \frac{(J_{total} + J_o) \text{ RPM}}{9,55 \times t_{aceleración}}$$

$$T_a = T_d = \frac{7,117 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2 + 1,5 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2 (500 \text{ rev/min})}{9,55 \times 4 \text{ s}}$$

$$T_a = T_d = 1,128 \times 10^{-4} \text{ Nm}$$

Con los resultados anteriores se obtiene que el torque total es igual a:

$$T_{Total} = T_a + T_L$$

$$T_{Total} = 0,005 \text{ Nm}$$

$$T_{Total(FS)} = 0,01 \text{ Nm} \quad (\text{aplicando un FS de 2})$$

De acuerdo a estas características se observó que el motor NEMA 17 posee la capacidad de llevar a cabo el movimiento del actuador. El siguiente modelo es el seleccionado.



Características:

- Modelo: OK42STH22-0804AC
- Material: Metal
- Color: Plata
- Dimensiones: 42x42x22mm (LxWxT)
- Angulo de Paso: 1.8°
- Voltaje: 3V
- Corriente: 0.8A
- Numero de fases: 2
- Inercia Rotor: 15g.cm²
- Torque: 0.09Nm

Figura 6.13. Características motor NEMA 17. Fuente: MicroJPM

Para los acoples que deben ir a la salida de cada motor y unir este al eje se seleccionó el siguiente elemento, el cual cumple con las dimensiones requeridas por el actuador (hace el acople de 8mm del eje del actuador a 5 mm del eje del motor).

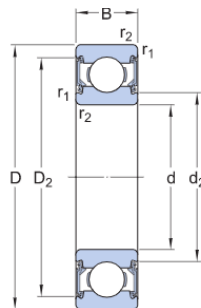


Figura 6.14. Acople flexible 5mm a 8mm. Fuente: MicroJPM.com

6.2.4. Selección de rodamientos

Como ya se ha descrito anteriormente, los rodamientos son elementos importantes en los mecanismos que poseen movimiento rotativo. En específico, los rodamientos rígidos de bolas permiten el soporte de carga axial y radial. En este aspecto lo primero que se hizo fue considerar las opciones que existen en el mercado, así como las dimensiones necesarias para acoplar estos elementos al eje diseñado.

Por medio de los catálogos del fabricante SKF, se encontró que una opción para este diseño son los rodamientos rígidos de bolas 608-2RSH, cuyas características son las siguientes:



DIMENSIONS

d	8 mm	Bore diameter
D	22 mm	Outside diameter
B	7 mm	Width
d ₂	≈ 10.55 mm	Recess diameter
D ₂	≈ 19.2 mm	Recess diameter
r _{1,2}	min. 0.3 mm	Chamfer dimension

Figura 6.15. Dimensiones y características del rodamiento rígido de bolas SKF 608-2RSH. Fuente: skf.com

DATOS DEL CÁLCULO

Capacidad de carga dinámica básica	C	3.45 kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	1.37 kN
Carga límite de fatiga	P _u	0.057 kN
Velocidad límite		22 000 r/min
Factor de carga mínima	k _r	0.025
Factor de cálculo	f ₀	12

Figura 6.16. Datos del cálculo del rodamiento rígido de bolas SKF 608-2RSH. Fuente: skf.com

También, es el propio fabricante que recomienda basarse en la normativa ISO 28 para hacer la correcta selección de este elemento. En la tabla 6.12 se pueden observar algunos datos necesarios para el cálculo de la vida nominal del rodamiento, donde también se muestran los valores de las cargas relacionadas a dicho rodamiento. En la figura 6.5 se describen los parámetros de selección para los rodamientos rígidos de bolas.

- L₁₀ = vida nominal básica (con una confiabilidad del 90%) [millones de revoluciones]
- L_{10h} = vida nominal SKF (con una confiabilidad del 90%) [horas de funcionamiento]
- C = capacidad de carga dinámica básica [kN]
- P = carga dinámica equivalente del rodamiento [kN]
- n = velocidad de giro [r. p. m.]
- p = exponente de la ecuación de la vida útil
 - para los rodamientos de bolas, **p = 3**
 - para los rodamientos de rodillos, **p = 10/3**

Figura 6.17. Parámetros de selección de los rodamientos. Fuente: (SKF, 2015)

Para este caso, el factor de limpieza N_c toma el valor de la unidad, esto debido a que se requiere que el proceso se exponga a la menor cantidad posible de contaminantes. Además, L₁₀

es igual a $\left(\frac{C}{P}\right)^p$, L_{10h} se define como $\frac{10^6}{60 \times RPM} \times L_{10}$ y L_{10mh} es igual a $askf \times L_{10h}$. El factor $askf$ se seleccionó por medio de las tablas proporcionadas por el fabricante.

De acuerdo a lo anterior se obtienen los siguientes datos, donde se puede observar que L_{10mh} es mayor a la vida útil, por ende, la selección del rodamiento es correcta.

Tabla 6.13. Datos calculados para seleccionar el rodamiento SKF 608-2RSH. Fuente: Elaboración propia.

Selección de rodamiento	
C (N)	3450
n (RPM)	500
p	3
P (N)	7,358
Pu (N)	57
L10 (revoluciones)	$10,308 \times 10^7$
L10h (horas)	$343,603 \times 10^7$
askf	2,5
L10mh (horas)	$859,007 \times 10^7$

6.3. Simulación y propuesta detallada

La validación del diseño mecánico se realizó mediante la herramienta de SolidWorks Motion. En primera instancia se debe hacer un análisis dinámico, donde se contemple el motor seleccionado, la carga que se encuentra en contacto con la tuerca a la hora de ejercerse el desplazamiento, la gravedad y el final de carrera del actuador. Por consiguiente, los cálculos mencionados en los puntos anteriores son esenciales para efectuar el análisis dinámico.

Una vez se logre que el ensamble en estudio se comporte tal y como se espera, se procede a exportar las cargas dinámicas al elemento que se desea analizar. En este caso se analizó el eje, ya que este es el elemento que determina la confiabilidad del conjunto mecánico.

En la siguiente figura se pueden apreciar los parámetros que se incluyeron en el análisis dinámico. Esto se realizó para un tiempo de 16 s, el cual fue calculado de forma teórica. La

fuerza que se añade al estudio corresponde a la carga que ejerce toda la estructura del cabezal sobre la carcasa de la tuerca.

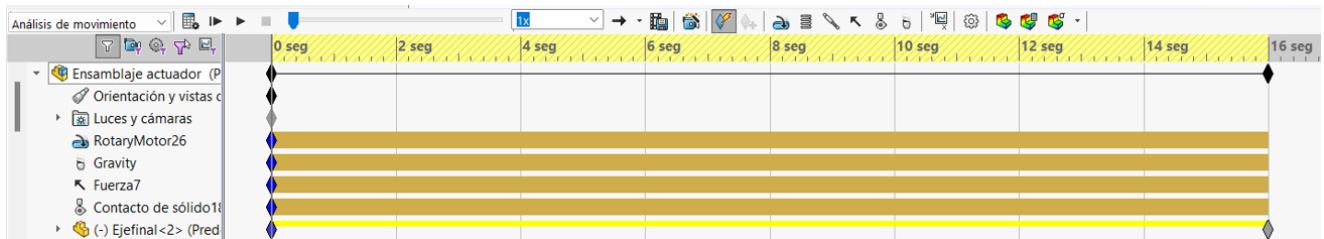


Figura 6.18. Parámetros añadidos al análisis dinámico en SolidWorks Motion. Fuente: Elaboración propia.

Después de comprobar que el actuador se comporta de la manera deseada mediante una animación, se configuró la opción de simulación, donde se agregó un intervalo de 0-16 s para el análisis específico del eje. Luego, se procedió con el cálculo de la simulación, donde una vez terminada la misma se inicia con la exportación de las cargas a la pieza ya mencionada (especificando el tiempo en el que se quiere analizar dicho elemento).

Este paso permite que se puedan observar los resultados de la tensión de Von-Mises, desplazamiento y las deformaciones unitarias. Tales resultados se encuentran en el Apéndice 4. Se hace énfasis en el resultado de tensiones de Von-Mises, ya que como se ve reflejado en la siguiente figura, el elemento en movimiento no sobrepasa el límite elástico del material (AISI 304). Lo anterior indica que el eje no fallará mientras se encuentre realizando la aplicación del recubrimiento.

Cabe destacar que en los apéndices se reúne la información planteada en este capítulo. Por ejemplo, la tabla donde se resumen los datos teóricos y previamente especificados (de acuerdo a los requerimientos del cliente) y los datos que se obtuvieron por medio de los cálculos anteriormente mencionados, se encuentra el Apéndice 1 (hoja de datos).

En el Apéndice 2 se encuentran los costos aproximados para cada una de las alternativas planteadas y en la tabla 12.5 está el costo detallado (costo real) de la propuesta desarrollada. En el Apéndice 3 está la memoria de cálculo, donde se muestran todos los pasos para llegar a obtener los datos previamente mencionados. Además, en el Apéndice 4, se muestran imágenes complementarias a los resultados de la simulación. Por último, en el Apéndice 5 se adjuntan cada uno de los planos necesarios para la fabricación de la máquina.

7. Plan de mantenimiento basado en RCM

Tabla 7.1. Plan de mantenimiento basado en confiabilidad para el dispositivo diseñado. Fuente: Elaboración propia.

Sistema	Sub ensamblaje 2 (TFG.EG.S2)						
Elemento	Eje del actuador (TFG.EG.S2.01)						
Función		Falla Funcional		Modo de falla		Efectos	Consecuencias
1	Transmisión de potencia	1	Desgaste de la rosca trapezoidal TR12x3	1	Distorsión del movimiento.	Pérdida de uniformidad en el movimiento.	No hay uniformidad en el recubrimiento aplicado.
				2	Se detiene el movimiento o se produce un cambio en la velocidad.	Pérdida del control de los parámetros. La velocidad que debería ser constante (0,025 m/s) deja de serlo.	Se pierde el control de la velocidad lineal. El espesor húmedo de la película termocrómica se ve comprometido.
Elemento	Motor NEMA 17 (OK42STH22-0804AC)						
1	Rotación del eje del actuador	1	Desgaste del eje del motor (vástago)	1	Desacople parcial o total con el resto del sistema.	No se genera una buena conexión con el acople flexible.	Se limita el movimiento del actuador, comprometiendo la funcionalidad del dispositivo.
		2	Fallo por factores ambientales	1	Daño parcial o total de los componentes del motor.	Averías en el proceso de producción del vidrio termocrómico. El motor puede dejar de funcionar por completo.	Corrosión de los componentes del motor. Daño del rotor. Fluctuaciones en corriente (I) y voltaje (V)
		3	Cableado defectuoso	1	I y V no deseados.	El motor deja de funcionar.	Cortocircuito. Problemas con el controlador.

(Continuación)

Elemento	Tuerca (XCF12X3M)								
Función		Falla Funcional		Modo de falla		Efectos		Consecuencias	
1	Desplazamiento del cabezal		1	Desgaste de la rosca interna	1	Acople incorrecto con el eje.	Pérdida de uniformidad en el movimiento.	No hay uniformidad en el recubrimiento aplicado. Se pierde el control de la velocidad lineal. El espesor húmedo de la película termocrómica se ve comprometido.	
					2	Se detiene el movimiento o se produce un cambio en la velocidad.	Pérdida del control de los parámetros. La velocidad que debería ser constante (0,025 m/s) deja de serlo.		
			2	Fractura del elemento	1	Se detiene el desplazamiento del cabezal.	No hay uniformidad en el movimiento. Funcionalidad de la máquina se ve comprometida.	Imposibilita la función de la máquina, no se puede aplicar el recubrimiento.	
Elemento	Rodamiento rígido de bolas (608-2RSH)								
Función		Falla Funcional		Modo de falla		Efectos		Consecuencias	
1	Transmisión de movimiento y carga		1	Desgaste del elemento	1	Distorsión del movimiento. Irregularidades en el movimiento del actuador.	Pérdida de uniformidad en el movimiento. Control ineficiente de parámetros como la velocidad constante de la máquina.	Recubrimiento carece de uniformidad. El desplazamiento puede volverse irregular y menos preciso.	
						2	Agrietamiento y/o fractura		

Tabla 7.2. Acciones de mantenimiento preventivo para el dispositivo diseñado, de acuerdo a las posibles fallas. Fuente: Elaboración propia.

N°	Acción proactiva	Frecuencia					Tiempo estimado de la tarea		Mano de obra requerida			Costo anual
		Semanal	Mensual	Bimensual	Semestral	Anual	Minutos	Horas	Cantidad	Costo/hora	Total	
		52/año	12/año	6/año	2/año							
Sistema	Sub ensamblaje 2 (TFG.EG.S2)											
Elemento	Eje del actuador (TFG.EG.S2.01)											
111	Lubricación del elemento.	x					10	0,17	1	€3 500	€595	€30 940
112	Verificar valor de velocidad.	x					20	0,34	1	€3 500	€1 190	€61 880
Elemento	Motor NEMA 17 (OK42STH22-0804AC)											
111	Verificar valores de I y V.	x					30	0,5	1	€3 500	€1 750	€91 000
121	Ventilar correctamente al motor, limpiar contaminantes en el mismo.	x					20	0,34	1	€3 500	€1 190	€61 880

(Continuación)

N°	Acción proactiva	Frecuencia					Tiempo estimado de la tarea		Mano de obra requerida			Costo anual
		Semanal	Mensual	Bimensual	Semestral	Anual	Minutos	Horas	Cantidad	Costo/hora	Total	
131	Verificar conexiones.				x		60	1	1	€3 500	€3 500	€7 000
Elemento	Tuerca (XCF12X3M)											
111	Verificar alineación con el eje.					x	60	1	1	€3 500	€3 500	€3 500
112	Lubricación del elemento	x					10	0,17	1	€3 500	€595	€30 940
121	Realizar inspecciones visuales.		x				20	0,34	1	€3 500	€1 190	€14 280
Elemento	Rodamiento rígido de bolas (608-2RSH)											
111	Lubricación del elemento	x					10	0,17	1	€3 500	€595	€30 940
121	Realizar inspecciones visuales.		x				20	0,34	1	€3 500	€1 190	€14 280
Total Anual = €346 640												

8. Conclusiones

- Se determinó que la característica reométrica más importante del recubrimiento es su viscosidad absoluta (en este caso su valor es de 0,015 Pas a 0,17 Pas). Las características técnicas y estructurales más importantes, que influyen en el diseño del Slot Die Coater, son la velocidad lineal máxima (25 mm/s) y el espesor del separador (0,15 mm). Además, los valores de h_d calculados aseguran un espesor de película húmeda de máximo 100 nm.

- Se propusieron 3 alternativas iniciales, que se diferenciaban por su técnica de recubrimiento, donde se logró determinar que la técnica ideal de recubrimiento para la creación de ventanas termocrómicas es el *slot die coating* (Alternativa 1).

- Se plantearon 3 ideas secundarias, que partieron de la Alternativa 1. De acuerdo a esto se determinó que debido a la etapa de diseño de la máquina y a su función, la alternativa ideal es la conformada por un indicador de altura MITUTOYO 543-302 y un actuador con una rosca externa TR 12 × 3 (Alternativa 1.1). Los planos de esta propuesta se encuentran en el Apéndice 5.

- Se validó el diseño por medio de un análisis dinámico realizado en el software SolidWorks, cuyos resultados se muestran en el Apéndice 4.

- Se documentó los requerimientos estructurales y técnicos del dispositivo en el Apéndice 1. El costo detallado de la propuesta se muestra en la tabla 12.5 del Apéndice 2, así como la comparación de costos con la opción disponible en el mercado en la tabla 5.5. También, se muestra el costo por mantenimiento en la tabla 7.2. Por último, los resultados teóricos se muestran a detalle en el Apéndice 3.

9. Recomendaciones

- Realizar una simulación del fluido en softwares más especializados, como lo son ANSYS o *Comsol Multiphysics*, esto con el fin de verificar la geometría del cabezal del Slot Die Coater.
- Considerar el uso de modelos matemáticos que analicen a la sustancia como un fluido tridimensional, esto para cuando se requiera escalar la máquina a dimensiones mayores. Es decir, en aplicaciones industriales es necesario un análisis más a fondo del comportamiento del fluido.
- Verificar la planicidad de la base de hierro fundido donada por la Universidad de Costa Rica. De no cumplir con lo especificado en el plano, el instrumento de medición (indicador de altura) no será aprovechado al máximo y se perderá la precisión de la máquina.
- Implementar estructura que permita el curado UV justo después de finalizar el recubrimiento, esto para evitar la contaminación en la superficie recubierta y asegurar las características termocrómicas del recubrimiento.
- Evaluar la posibilidad de construir un mecanismo adicional al diseño realizado, que permita generar vacío en la película del fluido para así evitar la formación de burbujas o demás irregularidades en la misma. Este paso se debería hacer una vez se sobreponga otro vidrio en la superficie ya recubierta.
- Recubrir con lubricante seco de grafito a aquellos elementos que involucren movimiento rotativo, esto para optimizar el desplazamiento del mecanismo y minimizar la fricción entre las piezas.

- Implementar actuador vertical debajo de la base de hierro fundido para mejorar la extracción del vidrio una vez realizado el proceso de recubrimiento.

10. Bibliografía

- Aburas, M., Soebarto, V., Williamson, T., Liang, R., Ebendorff-Heidepriem, H., & Wu, Y. (2019). Thermo-chromic smart window technologies for building application: A review. *Applied Energy*, 255, 113522. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.apenergy.2019.113522>
- Aburas, M., Ebendorff-Heidepriem, H., Lei, L., Li, M., Zhao, J., Williamson, T., ... & Soebarto, V. (2021). Smart windows–Transmittance tuned thermo-chromic coatings for dynamic control of building performance. *Energy and Buildings*, 235, 110717.
- Alfonso, A. I., Agustín, Y., & González-Elipe, R. (2019). DE COMO LAS VENTANAS PUEDEN SER INTELIGENTES: TERMOCROMISMO APLICADO. *Revista Cubana de Física*, 36(2), 155-159.
- Beer, F. P., Johnston, E.R., DeWolf, J.T., & Mazurek, D.F. (2017). *Mecánica de materiales* (7ma ed.). México: Mc Graw Hill.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2018). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (10ma ed.). México: McGraw-Hill.
- Chen, Z., Gao, Y., Kang, L., Du, J., Zhang, Z., Luo, H., & Tan, G. (2011). VO₂-based double-layered films for smart windows: Optical design, all-solution preparation and improved properties. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(9), 2677-2684. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.solmat.2011.05.041>
- Cielo, D., & Subiantoro, A. (2021). Net zero energy buildings in new zealand: Challenges and potentials reviewed against legislative, climatic, technological, and economic factors. *Journal of Building Engineering*, 44, 102970. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.jobbe.2021.102970>
- Conti, F. (2005). *Motores paso a paso*. TECNIBOOK EDICIONES.
- Cui, Y., Ke, Y., Liu, C., Chen, Z., Wang, N., Zhang, L., . . . Long, Y. (2018). Thermo-chromic VO₂ for energy-efficient smart windows. *Joule*, 2(9), 1707-1746. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.joule.2018.06.018>
- Devadiga, D., & Ahipa, T. N. (2022). A review on the emerging applications of 4-cyano-4'-alkylbiphenyl (nCB) liquid crystals beyond display. *Materials Science and Engineering: B*, 275, 115522. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.mseb.2021.115522>
- Ding, X., Liu, J. and Harris, T.A.L. (2016), A review of the operating limits in slot die coating processes. *AIChE J.*, 62: 2508-2524. <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1002/aic.15268>
- Drzaic, P. S. (1995). *Liquid crystal dispersions*.

- Garrido, S. G. (2010). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Ediciones Diaz de santos.
- Gobierno de Costa Rica. (2019). *Plan de Descarbonización*. <https://minae.go.cr/images/pdf/Plan-de-Descarbonizacion-1.pdf>
- Goda, T., Sasaki, Y., Mizuno, M., Morizawa, K., Katakura, H., & Tomiya, S. (2017). Numerical analysis for predicting the operability window of slot-die coating onto porous media. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14(5), 1053-1060.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mecánica de materiales* (L. Cruz, Ed.; 8th ed.). Prentice Hall.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica. (n.d.). *Qué es el TEC*. Recuperado el 09 de Setiembre, 2021, de <https://www.tec.ac.cr/node/8035>
- Instituto Tecnológico de Costa Rica. (n.d.). *Vicerrectoría de Investigación y Extensión*. Recuperado el 09 de Setiembre, 2021, de <https://www.tec.ac.cr/unidades/vicerrectoria-investigacion-extension>
- Jang, I., & Song, S. (2013). A model for prediction of minimum coating thickness in high speed slot coating. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 40, 180-185. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.01.002>
- Jin, G. L., Ahn, W. G., Kim, S. J., Nam, J., Jung, H. W., & Hyun, J. C. (2016). Effect of shim configuration on internal die flows for non-Newtonian coating liquids in slot coating process. *Korea-Australia Rheology Journal*, 28(2), 159-164.
- Jung, H., & Nam, J. (2019). Numerical analysis of pulsatile flows in a slot-die manifold. *Journal of Coatings Technology and Research*, 16(4), 1141-1151. doi:10.1007/s11998-019-00190-w
- Juinall, R., & Marshek, K. (2017). *Fundamentals of Machine Component Design* (5th ed.). New York: Wiley.
- Kamalisarvestani, M., Saidur, R., Mekhilef, S., & Javadi, F. S. (2013). Performance, materials and coating technologies of thermochromic thin films on smart windows. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 353-364. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.rser.2013.05.038>
- Khaled, K., & Berardi, U. (2021). Current and future coating technologies for architectural glazing applications. *Energy and Buildings*, 244, 111022. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.enbuild.2021.111022>
- Kim, G., Shin, D., Lee, J., & Park, J. (2019). Effect of surface morphology of slot-die heads on roll-to-roll coatings of fine PEDOT:PSS stripes. *Organic Electronics*, 66, 116-125. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.orgel.2018.12.033>

- Kim, T. H., Lee, D. Y., Sung, D. J., & Lyu, M. Y. (2013). Coater Die Design and Coating Quality Evaluation in the Machine Direction of Slot Coating Through Computer Simulation. *Elastomers and Composites*, 48(4), 282-287.
- Liu, K., Lee, S., Yang, S., Delaire, O., & Wu, J. (2018). Recent progresses on physics and applications of vanadium dioxide. *Materials Today*, 21(8), 875-896. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.mattod.2018.03.029>
- Malakhov, R., Tjiptowidjojo, K., & Schunk, P. R. (2019). Mechanics of the low-flow limit in slot-die coating with no vacuum. *AIChE Journal*, 65(6), e16593. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1002/aic.16593>
- Memon, S., Fang, Y., Abo-Zahhad, E. M., Abdelrehim, O., Elmarghany, M. R., Memon, A. R., ... & Darko, A. (2020). Factors influencing the performance parameters of vacuum glazed smart windows to net zero energy buildings. *International Journal of Solar Thermal Vacuum Engineering*, 2(1), 1-18.
- Mitov, M. (2020). *Advances in cholesteric liquid crystals* MDPI AG. Recuperado de <https://books.google.co.cr/books?id=s47ODwAAQBAJ>
- Mott, R. L. (2015). *Mecánica de fluidos (7ma ed.)*. Pearson Educación.
- Norton, R. L. (2009). *Diseño de maquinaria (4ta ed.)*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de máquinas: Un enfoque integrado (4ta ed.)*. Mexico D.F: Mc Graw Hill.
- Ochoterena, R., & Försth, M. (2018). The effect of thermochromic coatings of VO₂ on the fire performance of windows. *Fire and Materials*, 42(7), 873-876. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1002/fam.2630>
- Olavi Sol, C. (2020). *Thermally adaptive windows for energy efficient buildings: High performance composite and multilayer vanadium dioxide window coatings* (Doctoral dissertation, UCL (University College London)).
- Oswald, P., & Pieranski, P. (2005). *Nematic and cholesteric liquid crystals: concepts and physical properties illustrated by experiments*. CRC press.
- Outón Porras, J. (2020). *Preparación y caracterización de recubrimientos termocrómicos basados en VO₂ para su utilización en ventanas inteligentes*.
- Qu, Z., Yao, L., Zhang, Y., Jin, B., He, J., & Mi, J. (2019). Surface and interface engineering for VO₂ coatings with excellent optical performance: From theory to practice. *Materials Research Bulletin*, 109, 195-212. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.materresbull.2018.09.043>

- Quinones, D. M., & Carvalho, M. S. (2006). Effect of die lip configuration on the operating window of slot coating process. In 11th Brazilian Congress of Thermal Science and Engineering (ENCIT 2006), Curitiba.
- Salamati, M., Kamyabjou, G., Mohamadi, M., Taghizade, K., & Kowsari, E. (2019). Preparation of TiO₂@W-VO₂ thermochromic thin film for the application of energy efficient smart windows and energy modeling studies of the produced glass. *Construction and Building Materials*, 218, 477-482. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.046>
- Sartor, L. (1990). Slot coating: Fluid mechanics and die design (Ph.D.). Available from ProQuest One Academic. (303847947). Retrieved from <https://www-proquest-com.ezproxy.itcr.ac.cr/dissertations-theses/slot-coating-fluid-mechanics-die-design/docview/303847947/se-2?accountid=27651>
- Secor, R. B. (1997). Analysis and design of internal coating die cavities. In *Liquid Film Coating* (pp. 369-398). Springer, Dordrecht.
- Sistema Costarricense de Información Jurídica. (14 de Setiembre del 2015). VII Plan Nacional de Energía 2015-2030 N° 39219-MINAE. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80349&nValor3=101948&strTipM=TC
- SKF. (2015). Principios para la selección y la aplicación de los rodamientos. Grupo SKF 2015. Recuperado de: <https://epidor.com/documentos/27-Epidor-Technical-Distribution-Catalogo-Rodamientos-SKF.pdf>
- Stobo, A. (2017). Optimization of Fluid Properties and Process Parameters for Batch Slot Die Coating of Dilute Polymer Systems (Doctoral dissertation, Durham University).
- Solidworks Education. (2009). *Introducción a las aplicaciones de análisis de movimiento con SolidWorks Motion, guía del instructor*.
- Tällberg, R., Jelle, B. P., Loonen, R., Gao, T., & Hamdy, M. (2019). Comparison of the energy saving potential of adaptive and controllable smart windows: A state-of-the-art review and simulation studies of thermochromic, photochromic and electrochromic technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200, 109828. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.solmat.2019.02.041>
- Warwick, M. E., & Binions, R. (2014). Advances in thermochromic vanadium dioxide films. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(10), 3275-3292.
- Zhang, H., Yu, P., Zhong, T., Zhao, Y., Miao, Z., He, Z., & Shen, W. (2021). Preparation of chiral polymer/cholesteric liquid crystals composite films with broadband reflective capability for smart windows and thermal management of buildings. *Optical Materials*, 121, 111611. doi:<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.optmat.2021.111611>

11. Anexos

11.1. Anexo 1: Cotización mecanizado del cabezal



MLWS | PRECISION

CNC Machining • 3D Printing • Rapid Prototyping • Tools and Fixtures • Process and Equipment Development • Manufacturing Engineering

Ced. Jur. 3-101-695772

Cell phone: +506 8827-7986

e-Mail: info@mlws.cr

To: TEC - Evelyn Barquero

JOB	PAYMENT TERMS
Sub Ensamblaje 1	30 days

PN/DESC	MATERIAL	SURFACE T.	QTY	UNIT PRICE	DISCOUNT	LINE TOTAL
Matriz ranurada	SS 304	n/a	1	\$ 208.10	35%	\$ 135.26
Separador	SS 302*	n/a	1	\$ 247.10	35%	\$ 160.61
Matriz sin ranura	SS 304	n/a	1	\$ 223.74	35%	\$ 145.43

Notes: *0.15 mm thick. McMaster hardware included.
Delivery Date: 12-15 business days upon receipt of purchase order.

Subtotal	\$ 441.31
IVA %	\$ 57.37
Total	\$ 498.68

11.2. Anexo 2: Cotización de rodamientos SKF 608-2RSH



CÉDULA JURÍDICA 3101034953
 TELÉFONO: 4052-9000
 FAX: 2258-4908
 APDO: 602-1007
 www.balisacr.com
 CALLE 14, AVENIDAS 5 Y 7 BARRIO MEXICO,
 SAN JOSÉ, COSTA RICA

PROFORMA: 62897

NOMBRE DEL CLIENTE		CÓDIGO	CÉDULA	COND. PAGO	
EVELYN BARQUERO CAMBRONERO		C16330	207910230	CONTADO	
DIRECCIÓN			VENDEDOR		
COSTA RICA			Nolber Corrales Mejías		
CANT	COD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	DESC	VALOR
4	23402	Rodamiento Extra-pequeño de Balines 608-2RSH/C3 SKF 8X22X7	3,500.00	0	14,000.00
QUINCE MIL OCHOCIENTOS VEINTE Y 00 / 100 COLONES					
NOMBRE, FIRMA Y NÚMERO DE CÉDULA RECIBÍ DICHA MERCADERÍA CONFORME DE ACUERDO CON EL DETALLE ARRIBA ESPECIFICADO			SUBTOTAL DESC. 0.00% IVA TOTAL		14,000.00 0.00 1,820.00 15,820.00
Clas. Bancarias: BNCR 100-01-000-110377-9 // BCR 001-0209675-0 // BAC 903497709					
NOTAS: ENTREGA INMEDIATA					

12. Apéndices

12.1. Apéndice 1: Hoja de datos

Tabla 12.1. Hoja de datos del Slot Die Coater. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros otorgados por el cliente	
Descripción	Valor
Superficie de máxima	45 cm × 50 cm
Viscosidad absoluta	15 cps – 170 cps
Grosor del vidrio (desbaste en agujero para posicionar al sustrato)	6 mm
Superficie por recubrir	20 cm x 20 cm
Longitud total del Cabezal (Slot Die Head)	236 mm
Agujero en base para recolectar recubrimiento	220 mm x 10 mm
Agujero para extraer vidrio	80 mm x 80 mm
Parámetros seleccionados según bibliografía	
Descripción	Valor
Velocidad máxima del cabezal	25 mm/s
Espesor de película seca	40 nm – 100 nm
Ángulos de cuchillas de cabezal	30° y 45°
Radio de manifold o cavidad de entrada	4 mm
Dimensión Lu y Ld de las cuchillas	1 mm
Parámetros obtenidos en el diseño	
Descripción	Valor
Espesor de película húmeda*	100 nm
Diámetro nominal de la varilla roscada (actuador)	12 mm
Varilla roscada (métrica trapezoidal)	TR 12 X 3
Resolución del indicador de altura MITUTOYO 543-302	0,001 mm
Rango mínimo para hd**	$7,605 \times 10^{-5} m$ - $6,708 \times 10^{-6} m$
Tolerancia de planicidad para la base en la que se soporta el mecanismo	$\pm 2\mu m$
Caudal de referencia que va hacia la entrada del cabezal	$5,00E-10 m^3/s$
Espesor del separador	0,15 mm

*Se seleccionó este valor ya que aún no se tiene el conocimiento de cuál es el porcentaje de solutos en la sustancia a base de VO₂ (recubrimiento termocrómico). De esta forma se asegura que se va a obtener un espesor de película seca en el rango especificado. Esto da la posibilidad de jugar con el valor de hd, de ser necesario a la hora de la fase de experimentación.

**En fase de experimentación es importante analizar el espesor de la película seca respecto a la distancia hd (igual a hu), por lo que este es el rango necesario para lograr 100 nm de espesor húmedo, mas la máquina no se limito a dicho rango. Es decir el cabezal posee un mayor rango de movilidad.

12.2. Apéndice 2: Desglose de costos de materiales para cada propuesta

Tabla 12.2. Costos preliminares aproximados del mecanismo (Alternativa 1). Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Cantidad	Características	Precio	Total
Cabezal	1	Materiales: 302 SST y 304 SST.	€334 000	€334 000
MITUTOYO 543-302 (Indicador)	1	Digital Dial Gauge con resolución de 0,001 mm	€361 400	€361 400
Acople 5 mm -8mm	2	Acopla al motor con el eje (5mm - 8mm)	€3 975	€7 950
Motor a pasos NEMA 17	2	Peso: 0,68 kg. Voltaje: 24 VDC. Step Angle: 1,8°.	€13 325	€26 650
Soporte NEMA 17	2	Soporte	€5 310	€10 620
Varilla roscada Metric Trapezoidal	2	Incluye tuerca. Precio de los dos actuadores.	€193 720	€193 720
Tornillo micrometrico	1	Se extrae de una cabeza micrométrica de bajo costo.	€44 602	€44 602
Rodamientos	4	Forman parte de los actuadores	€5 375	€21 500
Aluminio AA 6061	1	Estructura para soportes	€35 000	€35 000
Total (aproximado)				€1 000 000

Tabla 12.3. Costos preliminares aproximados del mecanismo (Alternativa 2). Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Cantidad	Características	Precio	Total
Cabezal de inyección	1	Cabezal para inyección de tinta (repuesto de R330)	€102 720	€102 720
Ruedas	4	Se utilizan en el eje que contiene al cabezal de inyección	€3 530	€14 120
Rodamientos para ruedas	4	Se utilizan en el eje que contiene al cabezal de inyección	€3 145	€12 580
Soporte del cabezal	1	Necesario para el montaje del cabezal.	€14 125	€14 125
Polea con rodamientos	1	Necesaria para montaje de correa	€3 175	€3 175
Soporte de polea	1	Montaje de la polea	€10 270	€10 270
Soporte de motor	3	Permite conexión del motor con el sistema	€5 100	€15 300
Polea para el eje del motor	1	Conexión del motor con la correa dentada	€17 335	€17 335
Correa dentada de goma	1	Material: caucho. Separación entre dientes: 2 mm.	€4 170	€4 170
Motor a pasos NEMA 17 con su soporte	3	Voltaje: 24 VDC. Step Angle: 1,8°.	€46 000	€138 000
Varilla roscada	2	Elemento de transmisión de potencia en los ejes "y"	€50 000	€100 000
Varilla para bomba de jeringa	1	Varilla roscada T8	€2 500	€2 500
Total (aproximado)				€450 000

Tabla 12.4. Costos preliminares aproximados del mecanismo (Alternativa 3). Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Cantidad	Características	Precio	Total
Cabezal (aerosol)	1	Aerosol ultrafino (20-60 µm tamaño de gota).	€306 870	€306 870
Motor a pasos NEMA 17 con su soporte	3	Voltaje: 24 VDC. Step Angle: 1,8°.	€46 000	€138 000
Soporte del aerosol	1	Mecanismo que soporta al cabezal. Impresión 3D	€8 000	€8 000
Set de 2 vigas (eje x)	1	Forman parte del eje "x". Material: acero al carbono.	€52 000	€52 000
Varilla roscada (set)	2	Set que conforma al eje "y"	€50 000	€100 000
Varilla roscada (eje x)	1	Varilla para el eje "x". La cotización incluye tuerca T8. Material: acero inoxidable.	€7 000	€7 000
Soporte del motor (eje x)	1	Posiciona al motor en la estructura del eje "x"	€5 100	€5 100
Varilla roscada	1	Varilla roscada T8	€2 500	€2 500
Rodamientos	4	Forman parte de los actuadores	€5 375	€21 500
Total (aproximado)				€650 000

Tabla 12.5. Costos de la alternativa seleccionada (Alternativa 1.1). Fuente: Elaboración propia.

Empresa	Descripción	Cantidad	Características	Precio	Total
MLWS	Cabezal	1	Materiales: 302 SST y 304 SST. Cotizaciones ya incluyen tornillería del cabezal. MLWS hizo un 35% de descuento al TEC.	€334 000,00	€334 000,00
UCR	Base de hierro fundido	1	Estructura que soporta a los ejes y al Slot Die Coater (DONACIÓN)	-	-
Micro Finish	Recubrimiento de teflón	1	Permite que la sustancia mantenga sus características (DONACIÓN)	-	-
Capris	Tornillo micrométrico	1	Se extrae de una cabeza micrométrica de bajo costo.	€44 602,36	€44 602,36
Capris	MITUTOYO 543-302 (Indicador)	1	Digital Dial Gauge con resolución de 0,001 mm	€361 388,00	€361 388,00
McMaster	Resortes 9065K585	4	Resortes de extensión: 0.630 pulgada	€12 504,96	€12 504,96
MicroJPM	Acople 5 mm -8mm	2	Acopla al motor con el eje (5mm - 8mm)	€3 974,60	€7 949,20
MicroJPM	Motor a pasos NEMA 17	2	Peso: 0,68 kg. Voltaje: 24 VDC. Step Angle: 1,8°.	€13 326,60	€26 653,20
MicroJPM	Soporte NEMA 17	2	Soporte	€5 310,60	€10 621,20
Thompson Linear	Varilla roscada Metrica Trapezoidal con tuerca	2	Incluye tuerca. Precio incluye los dos actuadores, se cotizó envío en Aeropost	€291 248,00	€291 248,00
Unitorni	Tornillos M4x0.7 cabeza plana	8	Para la estructura del cabezal	€167,85	€1 342,80
Unitorni	Tornillos M5x0.8 cabeza redonda	8	Para la estructura del cabezal	€127,50	€1 020,00
Novex	Escuadra de unión 90°	4	Para la estructura del cabezal	€50,00	€200,00
Unitorni	Sujeción resortes	8	Pieza que sujeta a los resortes, dos por cada resorte	€50,00	€400,00
Unitorni	C ring	4	Para retener rodamiento en eje	€500,00	€2 000,00
Unitorni	M5x0.8x15 cabeza redonda	6	Para unir tuerca con su carcasa	€127,00	€762,00
Unitorni	M6x1x50 Allen cabeza cilíndrica	6	Para unir carcasa rodamiento con base	€320,00	€1 920,00
Balisa	Rodamientos	4	SKF 608-2RSH	€15 820,00	€15 820,00
Aceros Cartago	Aluminio AA 6061	1	Estructura que soporta a la matriz ranurada (cabezal) y carcasa de tuerca.	€50 000,00	€50 000,00
EPA	Lubricante de grafito en seco	1	Lubricante de mantenimiento, para altas rev/min	€5 500,00	€5 500,00
Total					€1 167 932

Tabla 12.6. Costos aproximados de la alternativa con micrómetros (Alternativa 1.2). Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Cantidad	Características	Precio	Total
Cabezal	1	Materiales: 302 SST y 304 SST.	€334 000,00	€334 000,00
Cabezas micrométricas	2	Micrómetro con resolución de 0,001 mm	€228 552,00	€457 104,00
Rodamientos	4	Forman parte de los actuadores	€5 375,00	€21 500,00
Motor a pasos NEMA 17 con su soporte	3	Voltaje: 24 VDC. Step Angle: 1,8°.	€46 092,00	€138 276,00
Varilla roscada Metric Trapezoidal	2	Incluye tuerca. Precio de los dos actuadores.	€193 720,00	€193 720,00
Carcasa del sistema (en acrílico)	1	Laminas de acrílico: 122 cm x 244 cm.	€10 560,00	€10 560,00
Aluminio AA 6061	1	Estructura para soportes	€35 000,00	€35 000,00
Varilla para bomba de jeringa	1	Varilla roscada T8	€2 500,00	€2 500,00
Mecanismo bomba de jeringa	1	Piezas para sujeción de jeringa y actuador.	€25 000,00	€25 000,00
Total (aproximado)				€1 217 660

Tabla 12.7. Costos aproximados de la alternativa con indicador y actuador de husillo de bolas (Alternativa 1.3). Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Cantidad	Características	Precio	Total
Cabezal	1	Materiales: 302 SST y 304 SST.	€334 000,00	€334 000,00
MITUTOYO 543-302 (Indicador)	1	Digital Dial Gauge con resolución de 0,001 mm	€361 388,00	€361 388,00
Rodamientos	4	Forman parte de los actuadores	€5 375,00	€21 500,00
Motor a pasos NEMA 17 con su soporte	3	Voltaje: 24 VDC. Step Angle: 1,8°.	€46 092,00	€138 276,00
Varilla roscada de bolas	2	Incluye tuerca. Precio de los dos actuadores.	€565 796,00	€565 796,00
Carcasa del sistema (en acrílico)	1	Láminas de acrílico: 122 cm x 244 cm.	€10 560,00	€10 560,00
Aluminio AA 6061	1	Estructura para soportes	€35 000,00	€35 000,00
Varilla para bomba de jeringa	1	Varilla roscada T8	€2 500,00	€2 500,00
Mecanismo bomba de jeringa	1	Piezas para sujeción de jeringa y actuador.	€25 000,00	€25 000,00
Total (aproximado)				€1 494 020

12.3. Apéndice 3: Memoria de cálculo

Diseño del cabezal

Planteamiento:

Se debe dimensionar el cabezal por medio de datos recomendados por fuentes fidedignas, así como por los cálculos pertinentes. El cabezal debe contar con dos matrices (una de estas con una cavidad o manifold) y un separador (cuyo espesor esta dado por la disponibilidad del material en el mercado). Este cabezal debe realizarse en acero inoxidable, además, se debe recubrir con teflón (esto ayuda a que la sustancia en contacto mantenga sus propiedades).

Operaciones:

Antes de iniciar con los cálculos, se deben tener presente los datos que se seleccionaron preliminarmente, así como su justificación dentro del diseño. Estos se muestran en la tabla 11.8. En primera instancia se calculará el caudal de suministro al Slot Die Coater, así como la caída de presión presente en el mismo. De acuerdo a estos se obtendrán los valores de velocidad dentro del cabezal para cada uno de los límites de viscosidad absoluta. Por último, se calculará la distancia h_d (igual a h_u), esta distancia es importante ya que es la que determinará el espesor húmedo de la película.

Tabla 12.8. Datos iniciales del diseño del cabezal. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Valor	Unidades usadas en memoria de cálculo	Descripción
Viscosidad (η)	15 cps – 170 cps	0,015 Pas – 0,17 Pas	Dato brindado por el cliente
Longitud del manifold (W)	200 mm	0,2 m	Dato brindado por el cliente, longitud máxima del vidrio.
Velocidad de avance del cabezal (U_w)	25 mm/s	0,025 m/s	Valor seleccionado de acuerdo a bibliografía. Artículo con mayor similitud a los requerimientos de este diseño: (Kim, Shin, Lee & Park, 2019)
Espesor de película húmeda ($h_{húmeda}$)	100 nm	1×10^{-7} m	Valor seleccionado de acuerdo a bibliografía. Para una sustancia similar: (Kamalisarvestani, Saidur, Mekhilef, & Javadi, 2013)
Ángulos de las cuchillas (θ)	30° y 45°	-	Valor seleccionado de acuerdo a bibliografía: (Kim et al, 2013).
Radio del manifold (R)	4 mm	-	Valor seleccionado de acuerdo a bibliografía: (Jung & Nam, 2019)
Espesor del separador (w)	150 μ m	$1,5 \times 10^{-4}$ m	Valor de acuerdo a la cotización del material.
Dimensiones máximas del cabezal, contemplando tornillería (LxA)	236 mm \times 35mm	-	Esto de acuerdo a las dimensiones del manifold y el material disponible en el mercado.
Distancia desde el manifold hasta la salida de la sustancia (I)	12 mm	0,012 m	Distancia obtenida al diseñar con las dimensiones ya mencionadas. Además, se contempla la materia prima disponible en el mercado.
Longitud de cuchillas ($Lu = Ld$)	1 mm	1×10^{-3} m	Distancia obtenida al diseñar con las dimensiones ya mencionadas. Además, se contempla la materia prima disponible en el mercado.
Valor “y” a evaluar en perfil de velocidad (H)	75 μ m	$7,5 \times 10^{-5}$ m	Es la mitad de la dimensión de espesor del separador.
Valor “x” a evaluar en perfil de velocidad (x)	0 μ m	0 m	Valor en el que la velocidad estudiada es mayor.
Presión atmosférica en Cartago (P_{atm})	1014 mbar	101 400 Pa	Valor promedio de la presión atmosférica según datos de: accuweather.com

Sartor (1990) establece que el caudal de suministro del Slot Die Coater es:

$$Q = WU_w h$$

$$Q = (0,025 \text{ m/s})(0,2 \text{ m})(1 \times 10^{-7} \text{ m})$$

$$Q = 5 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0,03 \text{ ml/min}$$

Stobo (2017) muestra que el cambio de presión dentro del Slot Die Coater es:

$$\Delta P = \frac{12\eta IQ}{w^3 W}$$

Donde el valor mínimo hace referencia al cambio de presión que se genera al utilizar un valor de viscosidad de 0,015 Pas, mientras que el valor máximo se da cuando existe un valor de viscosidad de 0,17 Pas.

$$\Delta P_{min} = \frac{12(0,015 \text{ Pas})(0,012 \text{ m})(5 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s})}{(0,00015 \text{ m})^3 (0,2 \text{ m})}$$

$$\Delta P_{min} = 1,6 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{max} = \frac{12(0,17 \text{ Pas})(0,012 \text{ m})(5 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s})}{(0,00015 \text{ m})^3 (0,2 \text{ m})}$$

$$\Delta P_{max} = 18,133 \text{ Pa}$$

El perfil de velocidad dentro del Slot Die Coater se define por medio de las ecuaciones de Navier-Stokes, según Ding, Liu & Harris este método para dimensionar a dicho dispositivo es ampliamente utilizado para diferentes aplicaciones. (2016)

Por ende, la velocidad del fluido dentro de la estructura del cabezal se determina de la siguiente manera:

- Fluido incompresible, 2D y totalmente desarrollado, donde $\frac{\partial V}{\partial z} = 0$.

- De acuerdo a la figura 3.8, al aplicar las ecuaciones de Navier-Stokes: $\eta \frac{d^2V}{dx^2} = \frac{\partial P}{\partial y} - \rho g \sin(\alpha)$. Donde $\alpha = 0$, debido a que el cabezal se encuentra paralelo al sustrato.

$$\eta \frac{d^2V}{dx^2} = \frac{\partial P}{\partial y}$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial P}{\partial y}$$

Integrando:

$$V(x) = \frac{1}{2\eta} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) x^2 + C1 + C2$$

Donde:

$$C1 = 0 \text{ y } C2 = \frac{-1}{2\eta} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) H^2$$

Por lo tanto:

$$V(x) = \frac{1}{2\eta} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) (x^2 - H^2)$$

Si $\frac{\partial P}{\partial y} = -\frac{P_{atm} - \Delta P}{L}$ y $L = Ld$:

$$V(x) = \frac{1}{2\eta} \left(-\frac{P_{atm} - \Delta P}{Ld} \right) (x^2 - H^2)$$

De acuerdo a esta formula se obtienen los valores de velocidad de acuerdo a la viscosidad del fluido (analizando la velocidad en la región de aguas abajo), donde se evalúan los valores de $x = 0$ y $H = 7,5 \times 10^{-5} m$.

$$V(x) @ 0,015 \text{ Pas} = \frac{1}{2(0,015 \text{ Pas})} \left(-\frac{101\,400 \text{ Pa} - 1,6 \text{ Pa}}{1 \times 10^{-3} \text{ m}} \right) (0^2 - (7,5 \times 10^{-5} \text{ m})^2)$$

$$V(x) @ 0,015 \text{ Pas} = 19,012 \text{ m/s}$$

$$V(x) @ 0,17 \text{ Pas} = \frac{1}{2(0,17 \text{ Pas})} \left(-\frac{101\,400 \text{ Pa} - 18,133 \text{ Pa}}{1 \times 10^{-3} \text{ m}} \right) (0^2 - (7,5 \times 10^{-5} \text{ m})^2)$$

$$V(x) @ 0,17 \text{ Pas} = 1,677 \text{ m/s}$$

Según Ding, Liu & Harris (2016), para una Slot Die Coater que no cuenta con algún mecanismo que ejerza vacío sobre el menisco de la sustancia, la velocidad del cabezal se puede expresar como:

$$U_w = \frac{2Q'}{h_d}$$

Donde Q' es valor limite del caudal bidimensional y h_d es la distancia desde las cuchillas del Slot Die Coater hasta el sustrato, además, el espesor de la película húmeda es igual a:

$$h_{húmeda} = \frac{2Q'}{V(x)}$$

Por lo tanto, al despejar Q' de ambas ecuaciones e igualar a las mismas, se obtiene:

$$\frac{U_w h_d}{2} = \frac{V(x) h_{húmeda}}{2}$$

$$U_w h_d = V(x) h_{húmeda}$$

$$h_d = \frac{V(x) h_{húmeda}}{U_w}$$

Por ende, al seleccionar una $h_{húmeda}$ de 1×10^{-7} m para garantizar que el espesor de película seca se cumpla, se logra averiguar la distancia h_d mínima a la que se debe modular la altura del cabezal. Tales valores, para cada caso de viscosidad, son:

$$h_d @ 0,015 \text{ Pas} = \frac{(19,012 \text{ m/s})(1 \times 10^{-7} \text{ m})}{0,025 \text{ m/s}}$$

$$h_d @ 0,015 \text{ Pas} = 7,605 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\mathbf{h_d @ 0,015 \text{ Pas} = 76,050 \mu m}$$

$$h_d @ 0,17 \text{ Pas} = \frac{(1,677 \text{ m/s})(1 \times 10^{-7} \text{ m})}{0,025 \text{ m/s}}$$

$$h_d @ 0,17 \text{ Pas} = 6,708 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$h_d @ 0,17 \text{ Pas} = 6,708 \mu\text{m}$$

Por último, el espesor de película seca se puede determinar como:

$$h_{seca} = h_{húmeda} \times \% \text{ de sólidos en la sustancia}$$

Cabe destacar que, como ya se ha indicado, este valor se calculará en fases posteriores de la investigación.

Diseño de los ejes (Análisis estático)

Planteamiento:

Se debe dimensionar el diámetro nominal de cada uno de los ejes. Estos en total son dos, uno para cada actuador. Cada actuador irá a cada extremo de la base y tendrán en su ensamble los mismos componentes, los cuales serán seleccionados de acuerdo a los resultados aquí planteados.

Operaciones:

El peso que soporta cada eje es el siguiente:

$$P = \frac{3 \text{ kg}}{2} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$P = 14,715 \text{ N}$$

Con una longitud de 40 cm para el desplazamiento de la tuerca, se tiene que el valor del momento flector máximo, es:

$$M = \frac{14,715 \text{ N}}{2} \times 0,2035 \text{ m} = 1,497 \text{ Nm}$$

Con un eje de acero inoxidable, donde $\tau_{max} = 517 \text{ MPa}$, el diámetro nominal de la varilla debe ser de:

$$d = 2 \times C$$

$$C = \sqrt[3]{\frac{M}{\frac{\pi}{2} \tau_{max}}} = \sqrt[3]{\frac{1,497 \text{ Nm}}{\frac{\pi}{2} 517 \text{ MPa}}}$$

$$C = 1,2261 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 2 \times (1,2261 \times 10^{-3} \text{ m}) = 2,452 \times 10^{-3} \text{ m} = 2,452 \text{ mm}$$

Como el eje requiere de un FS de 3 a 5, se seleccionó el siguiente diámetro:

$$FS = \frac{d_{nominal}}{d} = 5$$

$$d_{nominal} = FS \times d = 5 \times 2,452 \text{ mm} \approx 12 \text{ mm}$$

Por lo tanto:

$$FS = \frac{12 \text{ mm}}{2,452 \text{ mm}} \approx 5$$

Teniendo en cuenta las dimensiones de una varilla roscada métrica trapezoidal TR12 × 3 y los coeficientes de fricción dados por Budynas & Nisbett (2018), así como por el fabricante de la tuerca que se acopla al eje (ThompsonLinear), se obtienen los siguientes torques (Ver tablas 6.7 y 6.8):

$$T_u = T_{su} + T_c = \frac{Pd_p (\mu\pi d_p + L\cos\alpha)}{2 (\pi d_p \cos\alpha - \mu L)} + \mu_c P \frac{d_c}{2}$$

$$T_u = \frac{14,715 \text{ N} (10,415\text{mm})}{2} \times \frac{(0,1\pi(10,415\text{mm}) + 3\cos(15^\circ))}{(\pi(10,415\text{mm}) \cos(15^\circ) - 0,1(3\text{mm}))} + (0,09)(14,715 \text{ N}) \frac{15\text{mm}}{2}$$

$$\mathbf{T_u = 25 \text{ Nmm} = 0,025 \text{ Nm}}$$

$$T_d = T_{sd} + T_c = \frac{Pd_p (\mu\pi d_p - L\cos\alpha)}{2 (\pi d_p \cos\alpha + \mu L)} + \mu_c P \frac{d_c}{2}$$

$$T_d = \frac{14,715 \text{ N} (10,415\text{mm})}{2} \times \frac{(0,1\pi(10,415\text{mm}) - 3\cos(15^\circ))}{(\pi(10,415\text{mm}) \cos(15^\circ) + 0,1(3\text{mm}))} + (0,09)(14,715 \text{ N}) \frac{15\text{mm}}{2}$$

$$\mathbf{T_d = 11 \text{ Nmm} = 0,011 \text{ Nm}}$$

Los esfuerzos críticos para el eje son los siguientes:

$$T_{yz} = \frac{16T_r}{\pi d_r^3} = \frac{16T_u}{\pi d_r^3}$$

$$T_{yz} = \frac{16(0,025 \text{ Nm})}{\pi(8,5 \times 10^{-3} \text{ m})^3}$$

$$\mathbf{T_{yz} = 207616,279 \text{ Pa} = 0,208 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_y = \frac{-4F}{\pi d_r^2} = \frac{-4P}{\pi d_r^2}$$

$$\sigma_y = \frac{-4(14,715 \text{ N})}{\pi(8,5 \times 10^{-3} \text{ m})^2}$$

$$\mathbf{\sigma_y = -259317,923 \text{ Pa} = -0,259 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_x = \frac{6F}{\pi d_r p n_t} = \frac{6 \times (0,38F)}{\pi d_r p} = \frac{6 \times (0,38P)}{\pi d_r p}$$

$$\sigma_x = \frac{6 \times (0,38(14,715 \text{ N}))}{\pi(8,5 \times 10^{-3} \text{ m})(3 \times 10^{-3} \text{ m})}$$

$$\mathbf{\sigma_x = 418798,445 \text{ Pa} = 0,419 \text{ MPa}}$$

$$T_{zx} = \frac{-4T_r}{\pi d_r^2 p n_t} = \frac{-4(0,38T_r)}{\pi d_r^2 p} = \frac{-4(0,38T_u)}{\pi d_r^2 p}$$

$$T_{zx} = \frac{-4(0,38(0,025 \text{ Nm}))}{\pi(8,5 \times 10^{-3} \text{ m})^2(3 \times 10^{-3} \text{ m})}$$

$$\mathbf{T_{zx} = -55883,382 \text{ Pa} = -0,056 \text{ MPa}}$$

Por medio de la ecuación de Von- Mises, se obtiene el siguiente esfuerzo:

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\begin{aligned} \sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} & [(418798,445 \text{ Pa} - (-259317,923 \text{ Pa}))^2 + (-259317,923 \text{ Pa} - 0)^2 \\ & + (0 - 418798,445 \text{ Pa})^2 + 6((207616,279 \text{ Pa})^2 + (-55883,382 \text{ Pa})^2 \\ & + (0)^2)]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$$\sigma_e = 699944,483 \text{ Pa} = 0,700 \text{ MPa}$$

Por ende, el factor de seguridad es (con $S_y = 215 \text{ MPa}$):

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_e} = 307,143$$

Diseño de los ejes (Análisis dinámico)

Planteamiento:

Se debe realizar el análisis a fatiga del eje que compone al actuador.

Operaciones:

De acuerdo a las propiedades del eje (material AISI 304), se obtienen los siguientes valores:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e'$$

$$k_a = a S_{ut}^b$$

$$k_a = (4,51)(517)^{-0,265}$$

$$k_a = 0,861$$

$$k_b = 1,24 d^{-0,107}$$

$$k_b = 1,99$$

$$k_c = 0,59$$

$$k_d = 1$$

$$k_e = 0,814$$

$$k_f = k_{fs} = 1$$

$$S_e' = 0,5 S_{ut}$$

$$S_e' = 0,5(517 \text{ MPa})$$

$$S_e' = 258,5 \text{ MPa}$$

De esta forma, la ecuación de Marin genera el siguiente resultado para S_e :

$$S_e = (0,861)(1,99)(0,59)(1)(0,814)(1)(258,5 \text{ MPa})$$

$$S_e = 212,712 \text{ MPa}$$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left[\frac{1}{S_e} (4(k_f M_a)^2 + 3(k_{fs} T_a)^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} (4(k_f M_m)^2 + 3(k_{fs} T_m)^2)^{\frac{1}{2}} \right]$$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi(0,012)^3} \left[\frac{1}{212,712 \times 10^6 \text{ Pa}} (4(1,497 \text{ Nm})^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{517 \times 10^6 \text{ Pa}} (3(0,025 \text{ Nm})^2)^{\frac{1}{2}} \right]$$

$$\frac{1}{n} = 0,042$$

$$n = 23,809$$

Esto indica que el eje posee vida infinita y bajo las cargas correspondientes no tendrá fallas.

$$\sigma_{rev} = \frac{Mc}{I} = \frac{1,497 \text{ Nm} \times \frac{0,012 \text{ m}}{2}}{\frac{\pi}{64} \times (0,012 \text{ m})^4}$$

$$\sigma_{rev} = 8824257 \text{ Pa} = 8,824 \text{ MPa}$$

$$\% \text{ respecto a } S_y = \frac{8,824 \text{ MPa}}{215 \text{ MPa}} \times 100\% = 4,104\%$$

Esto indica que no hay falla debido al límite elástico del material.

Selección de motores y acoples

Planteamiento:

Tomando en cuenta los cálculos anteriores, se hizo la selección de los motores para cada actuador lineal (un motor por cada uno), así como el acople que permite la unión del motor al eje.

Operaciones:

Lo primero que se debe realizar es el cálculo de la eficiencia del actuador. En esta parte se usa una velocidad lineal de 25 mm/s (Ver tabla 6.11).

$$n = \frac{P_{out}}{P_u} = \frac{P \times U_w}{T_u \times V}$$

$$n = \frac{(14,715 \text{ N})(0,025 \text{ m/s})}{(0,025 \text{ Nm})(0,025 \text{ m/s} \times \frac{1}{3 \times 10^{-3} \text{ m/rev}} \times 2\pi)} = 0,281$$

$$n = 28,1 \%$$

Las inercias del eje y su tuerca, son respectivamente:

$$J_B = \frac{\pi}{32} \times \rho \times l \times (d_{nominal})^4$$

$$J_B = \frac{\pi}{32} \times 7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,4 \text{ m} \times (0,012 \text{ m})^4$$

$$J_B = 6,433 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

$$J_m = \left(\frac{L}{2\pi}\right)^2 \times m$$

$$J_m = \left(\frac{0,003 \text{ m}}{2\pi}\right)^2 \times 3 \text{ kg}$$

$$J_m = 6,839 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$$

$$J_{Total} = J_m + J_B$$

$$J_{Total} = 6,839 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2 + 6,433 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

$$J_{Total} = 7,117 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

A su vez, el peso en operación y en condición de precarga es:

$$F_{operación} = m \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times (\text{sen}\beta + \text{cos}\beta \times \mu)$$

$$F_{operación} = 3 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times (\text{sen}(0) + \text{cos}(0) \times 0,1)$$

$$F_{operación} = 2,943 \text{ N}$$

$$F_{precarga} = \frac{F_{operación}}{3}$$

$$F_{precarga} = 0,981 \text{ N}$$

El valor del torque es:

$$T_L = \frac{F_{operación} \times L}{2\pi \times n} + \frac{\mu \times F_{precarga} \times L}{2\pi}$$

$$T_L = \frac{2,943 \text{ N} \times 0,003 \text{ m/rev}}{2\pi \times 28,06\%} + \frac{0,1 \times 0,981 \text{ N} \times 0,003 \text{ m/rev}}{2\pi}$$

$$T_L = 0,005 \text{ Nm}$$

Las RPM requeridas por el motor son:

$$RPM = \frac{60 \times U_w}{L}$$

$$RPM = 60 \frac{s}{min} \times \frac{0,025 \frac{m}{s}}{0,003 \frac{m}{rev}}$$

$$RPM = 500 \text{ rev/min}$$

El tiempo total en realizarse el recorrido es igual a:

$$t_{total} = \frac{l}{U_w} = \frac{0,4 \text{ m}}{0,025 \text{ m/s}}$$

$$t_{total} = 16 \text{ s}$$

El tiempo de aceleración y desaceleración es:

$$t_{desaceleración} = t_{aceleración}$$

$$t_{aceleración} = 25\% \times t_{total} = 25\% \times 16 \text{ s}$$

$$t_{aceleración} = 4 \text{ s}$$

El radio de inercia es (donde J_o es la inercia del rotor de un motor NEMA 17) :

$$\text{Radio de inercia} = \frac{J_{Total}}{J_o} = \frac{7,117 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2}{1,5 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2}$$

$$\text{Radio de inercia} = 4,745 \approx 5$$

El torque para la aceleración y desaceleración del motor, es:

$$T_a = T_d = \frac{(J_{Total} + J_o) \text{ RPM}}{9,55 \times t_{aceleración}}$$

$$T_a = T_d = \frac{7,117 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2 + 1,5 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2 (500 \text{ rev/min})}{9,55 \times 4 \text{ s}}$$

$$T_a = T_d = 1,128 \times 10^{-4} \text{ Nm}$$

Por lo tanto, el torque total es igual a:

$$T_{Total} = T_a + T_L = 1,128 \times 10^{-4} \text{ Nm} + 0,005 \text{ Nm}$$

$$T_{Total} \approx 0,005 \text{ Nm}$$

Con un factor de seguridad de 2, el torque final es igual a:

$$T_{Total(FS)} = 2 \times T_{Total} = 2 \times 0,005 \text{ Nm}$$

$$T_{Total(FS)} = 0,01 \text{ Nm}$$

Por ende, se determina que un motor a pasos NEMA 17, cumple con los requerimientos del diseño. Además, el acople seleccionado es igual a un acople flexible 5mm- 8mm, esto de acuerdo a las dimensiones del eje del motor y del eje del actuador.

Selección de rodamientos

Planteamiento:

Según las dimensiones propuestas para el eje del actuador lineal, así como la aplicación de la máquina, se seleccionó un rodamiento rígido de bolas. Preliminarmente se eligió un rodamiento SKF 608-2RSH, por lo que se harán los cálculos para verificar la funcionalidad de los mismos.

Operaciones:

Teniendo en cuenta las dimensiones y datos del rodamiento dados en las figuras 6.4 y 6.5, respectivamente, se tiene que $C = 3,45 \text{ kN}$ y $P_u = 0,057 \text{ kN}$. Además, de acuerdo al fabricante SKF, el exponente de la ecuación de vida útil es igual a $p = 3$ (esto según el tipo de rodamiento seleccionado).

Por ende, considerando los cálculos anteriores, la vida nominal del rodamiento es:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p = \frac{3,45 \times 10^3 \text{ N}^3}{7,358 \text{ N}}$$

$$L_{10} = \mathbf{103080836,6 \text{ rev}}$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \times RPM} \times L_{10} = \frac{10^6}{60 \times 500 \text{ rev/min}} \times 103080836,6 \text{ rev}$$

$$L_{10h} = \mathbf{3436027887 \text{ horas}}$$

$$L_{10mh} = askf \times L_{10h} = 2,5 \times 3436027887 \text{ horas}$$

$$L_{10mh} = 8590069717 \text{ horas}$$

El factor *askf* se averiguo por medio de las tablas proporcionadas por el fabricante. Debido a que L_{10mh} es mayor a la vida útil, se puede asegurar que la selección del rodamiento es correcta.

12.4. Apéndice 4: Resultados de simulación

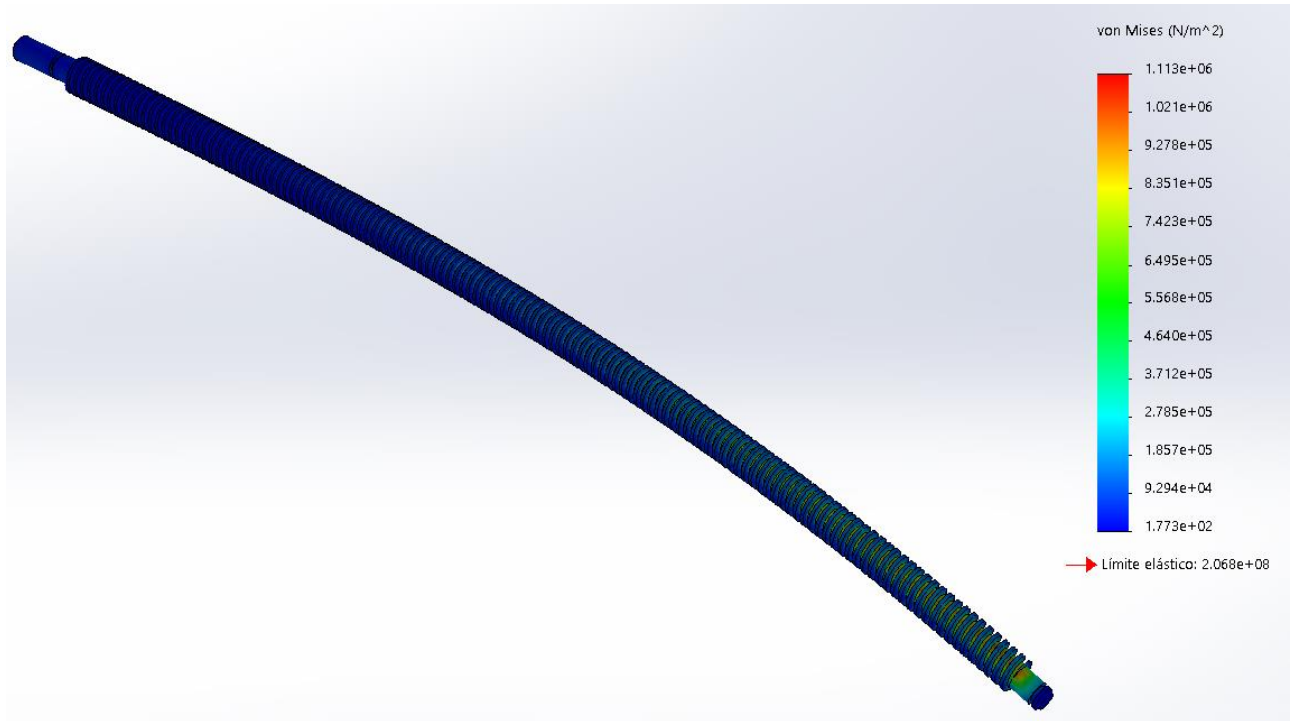


Figura 12.1. Resultados de tensión Von-Mises en el eje del actuador. Fuente: Elaboración propia.

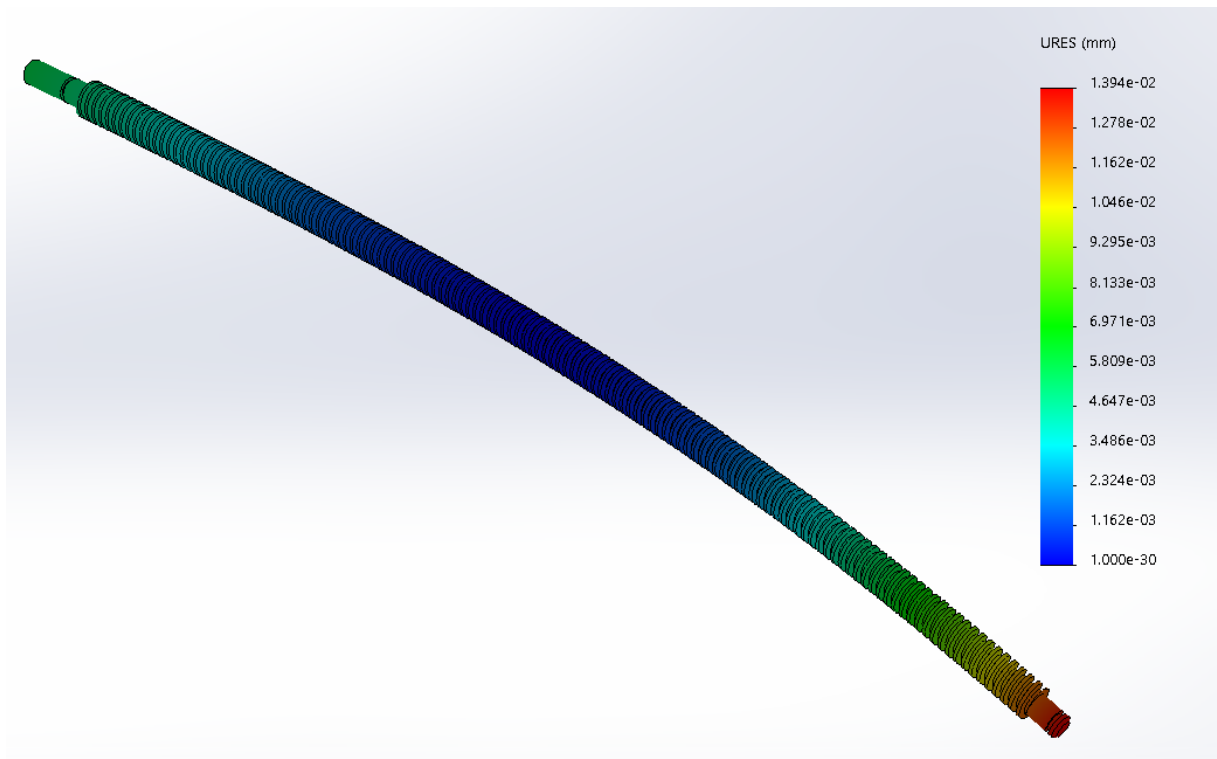


Figura 12.2. Resultados de los desplazamientos en el eje del actuador. Fuente: Elaboración propia.

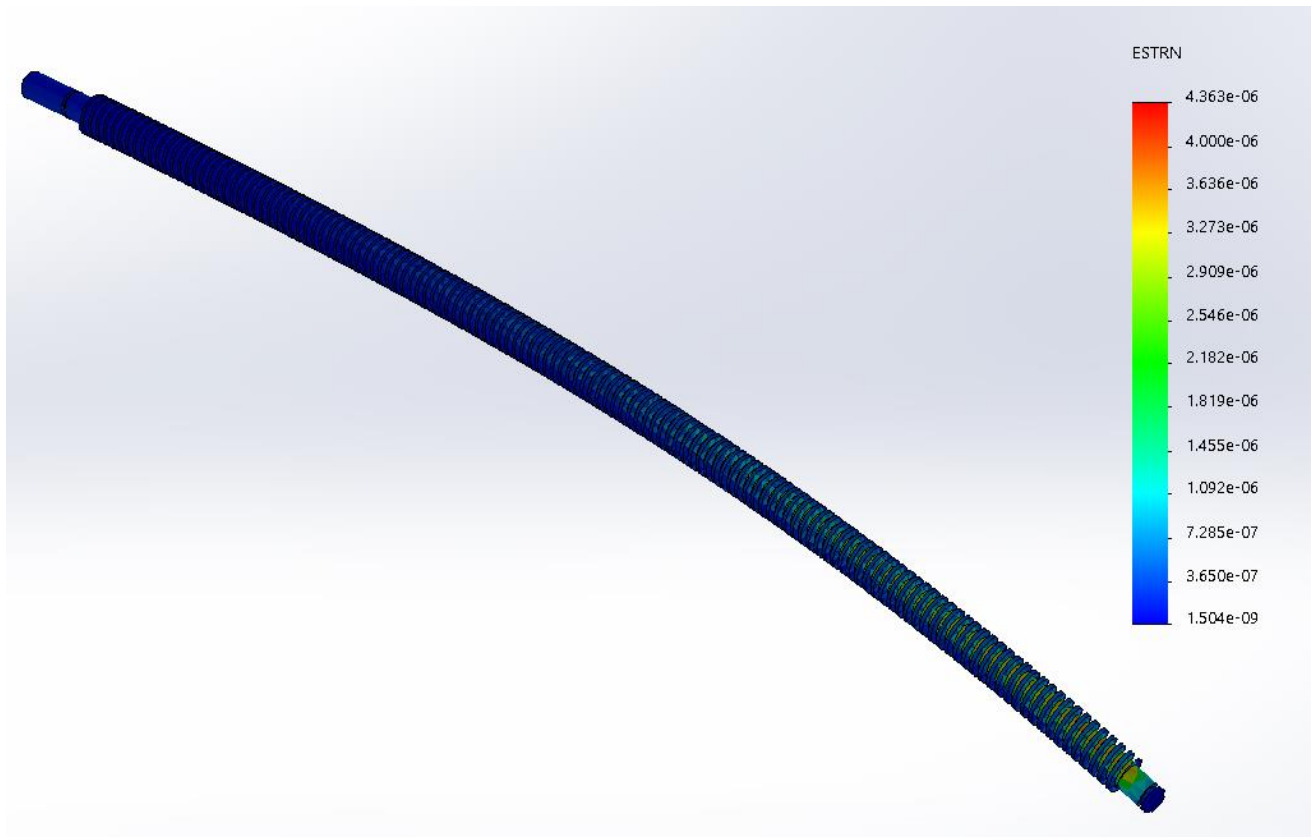


Figura 12.3. Resultados de las deformaciones unitarias en el eje del actuador. Fuente: Elaboración propia.

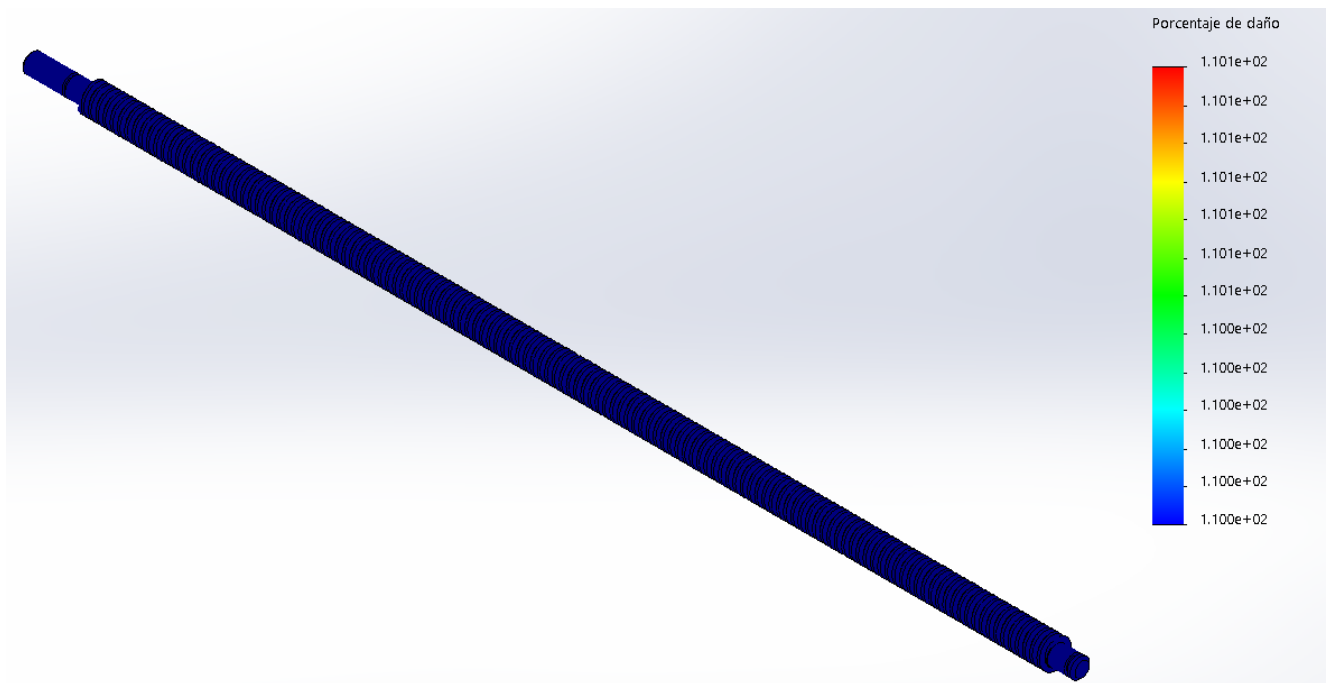


Figura 12.4. Resultados análisis de fatiga (Vida total). Fuente: Elaboración propia.

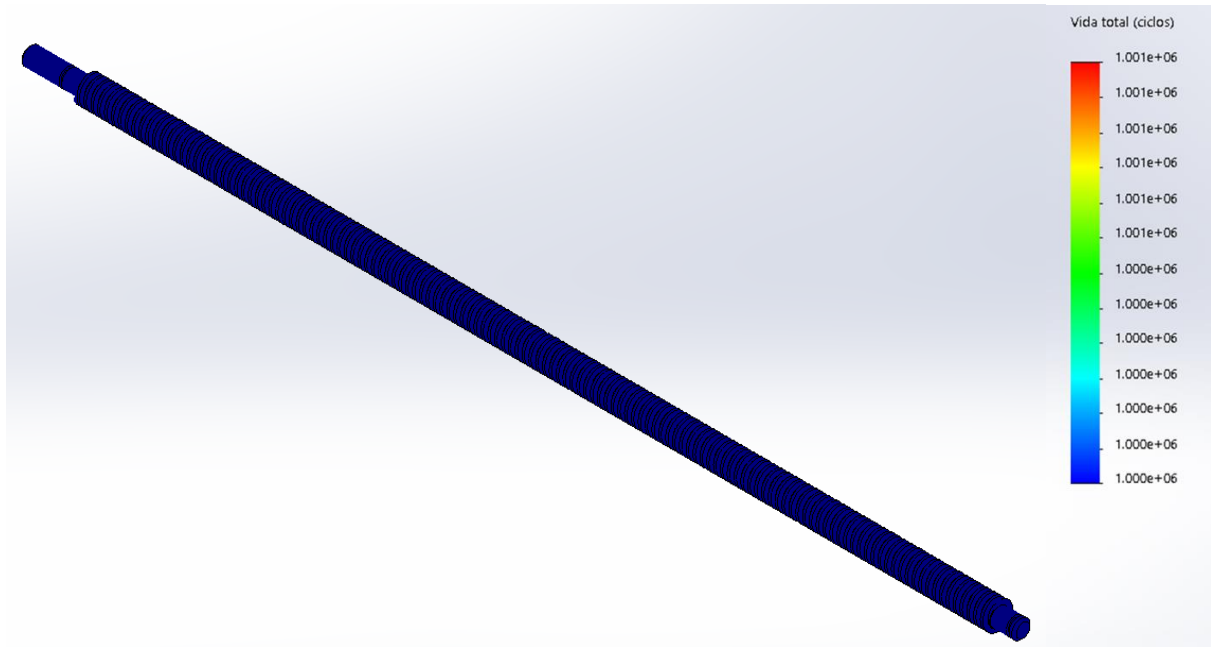
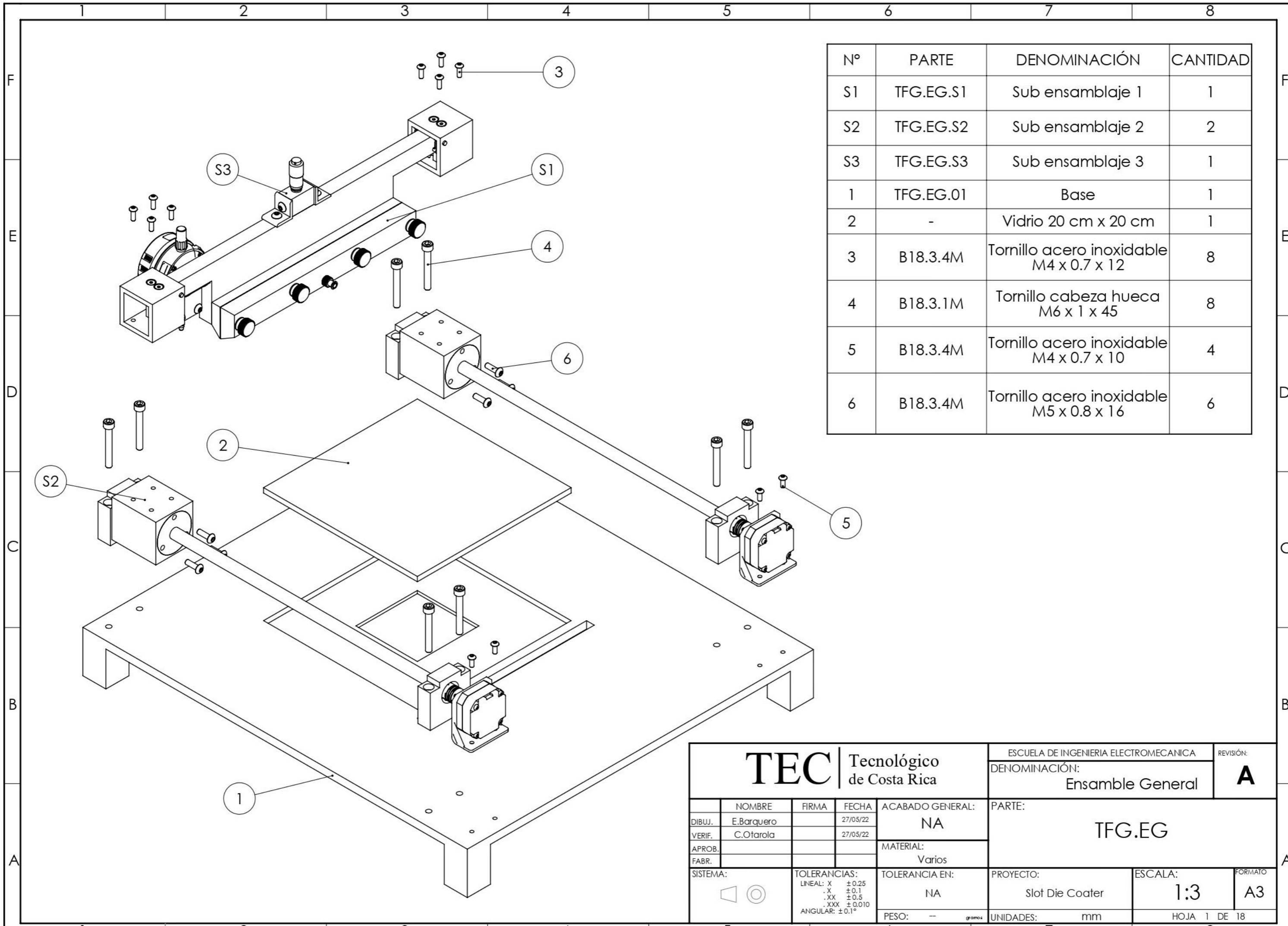


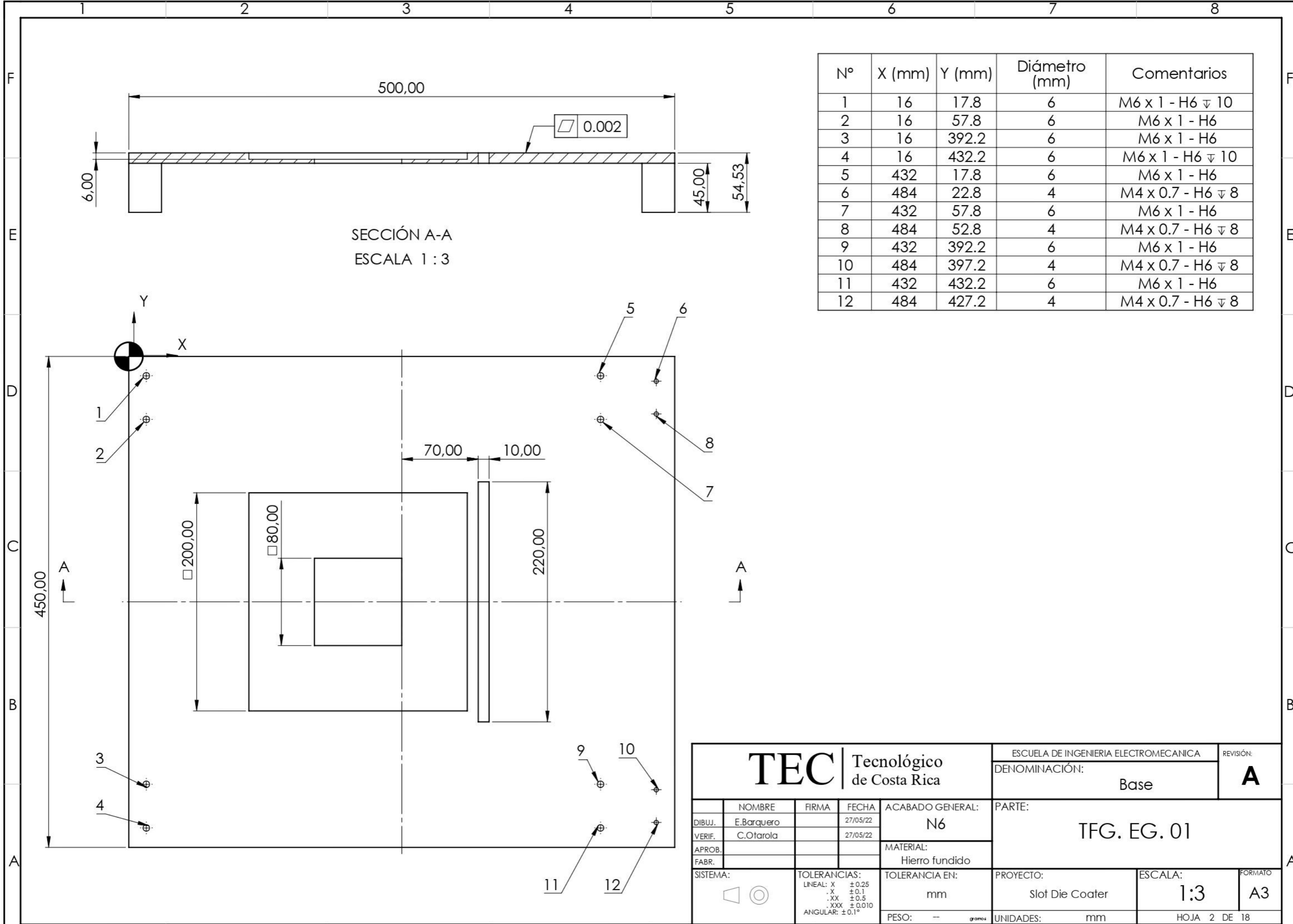
Figura 12.5. Resultados análisis de fatiga (Porcentaje de daño). Fuente: Elaboración propia.

12.5. Apéndice 5: Planos



N°	PARTE	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
S1	TFG.EG.S1	Sub ensamblaje 1	1
S2	TFG.EG.S2	Sub ensamblaje 2	2
S3	TFG.EG.S3	Sub ensamblaje 3	1
1	TFG.EG.01	Base	1
2	-	Vidrio 20 cm x 20 cm	1
3	B18.3.4M	Tornillo acero inoxidable M4 x 0.7 x 12	8
4	B18.3.1M	Tornillo cabeza hueca M6 x 1 x 45	8
5	B18.3.4M	Tornillo acero inoxidable M4 x 0.7 x 10	4
6	B18.3.4M	Tornillo acero inoxidable M5 x 0.8 x 16	6

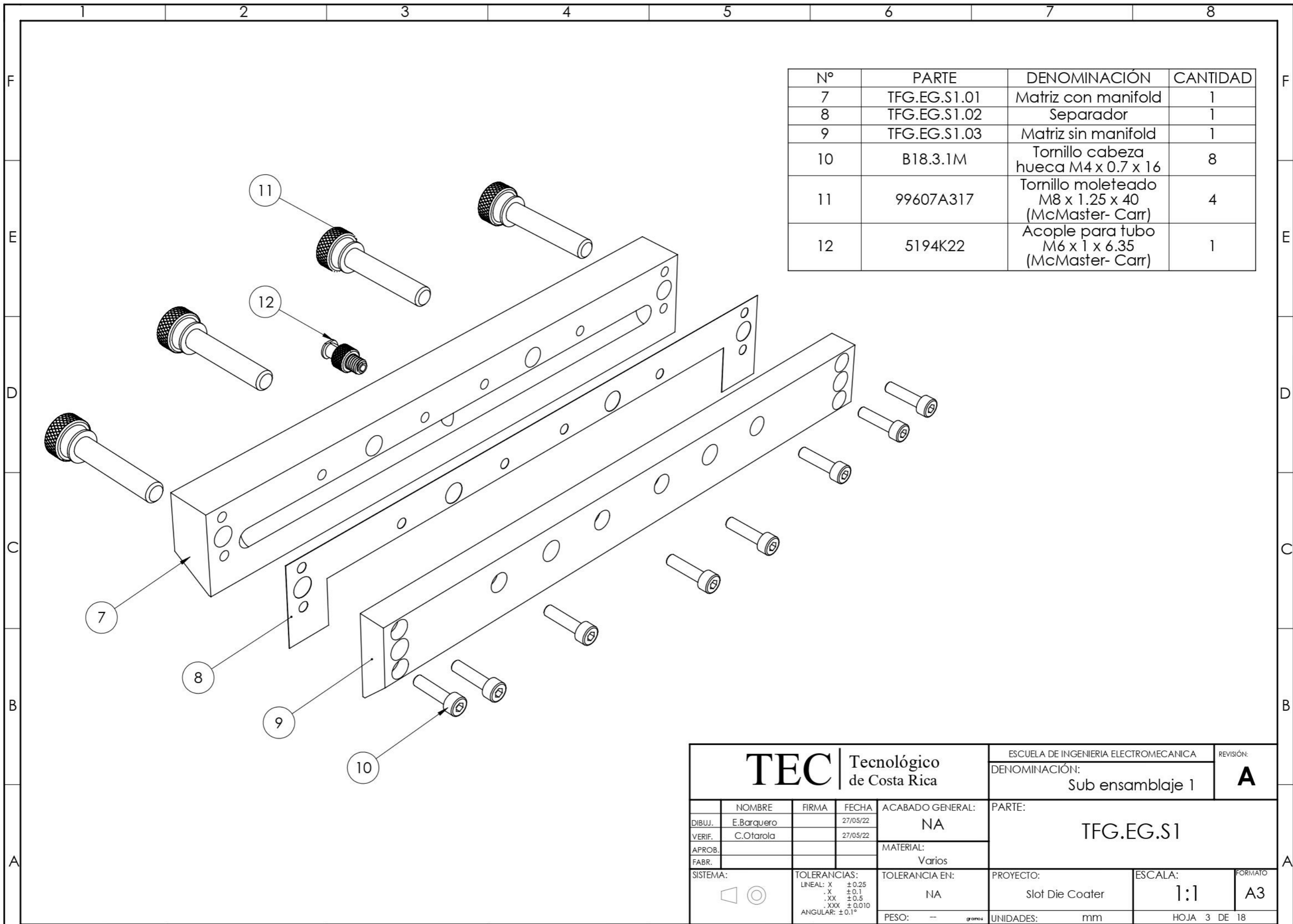
TEC Tecnológico de Costa Rica				ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA		REVISIÓN:
				DENOMINACIÓN:		A
				Ensamble General		
				PARTE:		
				TFG.EG		
NOMBRE		FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	PARTE:	
DIBUJ. E.Barquero			27/05/22	NA		
VERIF. C.Otarola			27/05/22	MATERIAL:		
APROB.				Varios		
FABR.				TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		NA	Slot Die Coater	1:3
		LINEAL: X ±0.25		PESO: -- gramos	UNIDADES: mm	FORMATO
		.X ±0.1				A3
		.XX ±0.5				
		.XXX ±0.010				
		ANGULAR: ±0.1°				
				HOJA 1 DE 18		



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 3

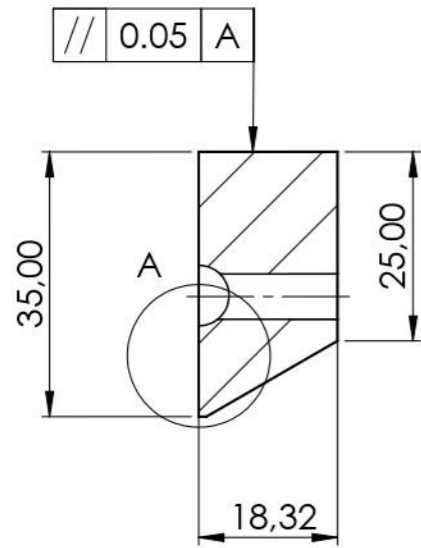
Nº	X (mm)	Y (mm)	Diámetro (mm)	Comentarios
1	16	17.8	6	M6 x 1 - H6 ∇ 10
2	16	57.8	6	M6 x 1 - H6
3	16	392.2	6	M6 x 1 - H6
4	16	432.2	6	M6 x 1 - H6 ∇ 10
5	432	17.8	6	M6 x 1 - H6
6	484	22.8	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 8
7	432	57.8	6	M6 x 1 - H6
8	484	52.8	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 8
9	432	392.2	6	M6 x 1 - H6
10	484	397.2	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 8
11	432	432.2	6	M6 x 1 - H6
12	484	427.2	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 8

TEC Tecnológico de Costa Rica				ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA		REVISIÓN:																				
				DENOMINACIÓN: Base		A																				
<table border="1"> <tr> <td>NOMBRE</td> <td>FIRMA</td> <td>FECHA</td> <td>ACABADO GENERAL:</td> </tr> <tr> <td>DIBUJ. E.Barquero</td> <td></td> <td>27/05/22</td> <td>N6</td> </tr> <tr> <td>VERIF. C.Otarola</td> <td></td> <td>27/05/22</td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROB.</td> <td></td> <td></td> <td>MATERIAL:</td> </tr> <tr> <td>FABR.</td> <td></td> <td></td> <td>Hierro fundido</td> </tr> </table>				NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	DIBUJ. E.Barquero		27/05/22	N6	VERIF. C.Otarola		27/05/22		APROB.			MATERIAL:	FABR.			Hierro fundido	PARTE: TFG. EG. 01		
NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:																							
DIBUJ. E.Barquero		27/05/22	N6																							
VERIF. C.Otarola		27/05/22																								
APROB.			MATERIAL:																							
FABR.			Hierro fundido																							
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:		PROYECTO:		ESCALA:		FORMATO:																
		LINEAL: X \pm 0.25 .X \pm 0.1 .XX \pm 0.5 .XXX \pm 0.010 ANGULAR: \pm 0.1°		mm		Slot Die Coater		1:3		A3																
PESO: -- gramos				UNIDADES: mm		HOJA 2 DE 18																				

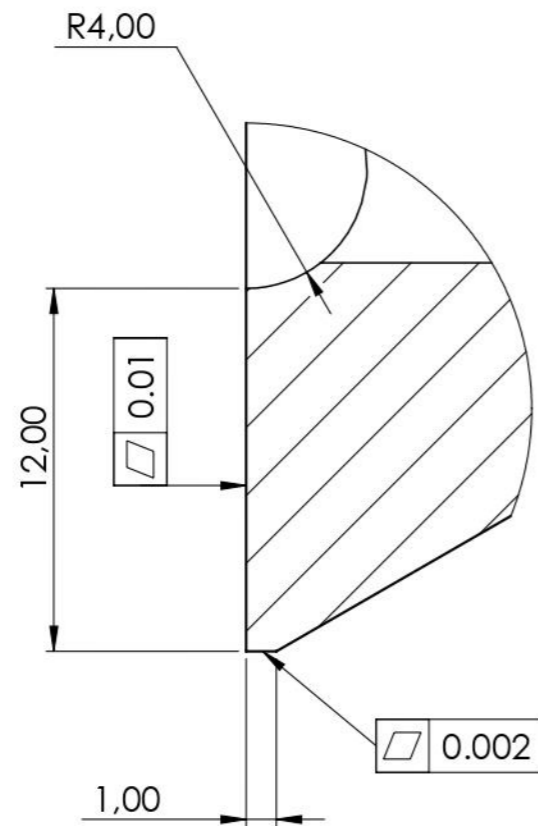
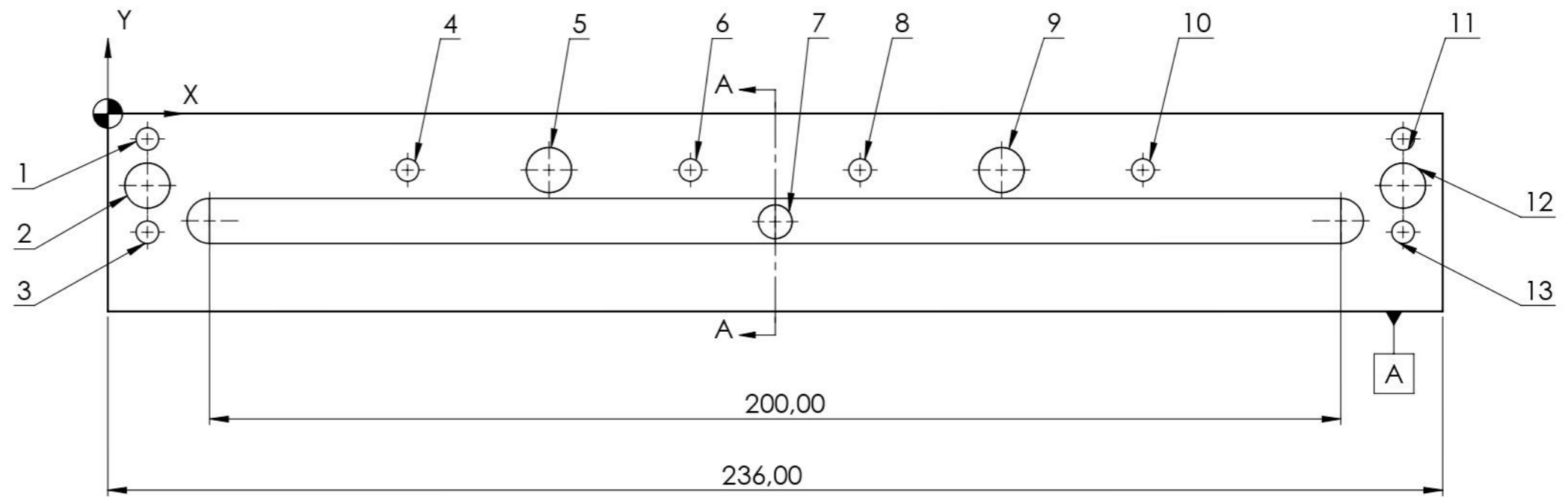


N°	PARTE	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
7	TFG.EG.S1.01	Matriz con manifold	1
8	TFG.EG.S1.02	Separador	1
9	TFG.EG.S1.03	Matriz sin manifold	1
10	B18.3.1M	Tornillo cabeza hueca M4 x 0.7 x 16	8
11	99607A317	Tornillo moleteado M8 x 1.25 x 40 (McMaster- Carr)	4
12	5194K22	Acople para tubo M6 x 1 x 6.35 (McMaster- Carr)	1

TEC Tecnológico de Costa Rica				ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA		REVISIÓN:																									
				DENOMINACIÓN: Sub ensamblaje 1		A																									
<table border="1"> <tr> <td>DIBUJ.</td> <td>E.Barquero</td> <td>FIRMA</td> <td></td> <td>FECHA</td> <td>27/05/22</td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td>C.Otarola</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>27/05/22</td> </tr> <tr> <td>APROB.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FABR.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>				DIBUJ.	E.Barquero	FIRMA		FECHA	27/05/22	VERIF.	C.Otarola				27/05/22	APROB.						FABR.						ACABADO GENERAL: NA		PARTE: TFG.EG.S1	
DIBUJ.	E.Barquero	FIRMA		FECHA	27/05/22																										
VERIF.	C.Otarola				27/05/22																										
APROB.																															
FABR.																															
SISTEMA: □ ○				TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.5 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		TOLERANCIA EN: NA		PROYECTO: Slot Die Coater																							
				PESO: -- gramos		UNIDADES: mm		ESCALA: 1:1																							
						UNIDADES: mm		FORMATO A3																							
						UNIDADES: mm		HOJA 3 DE 18																							



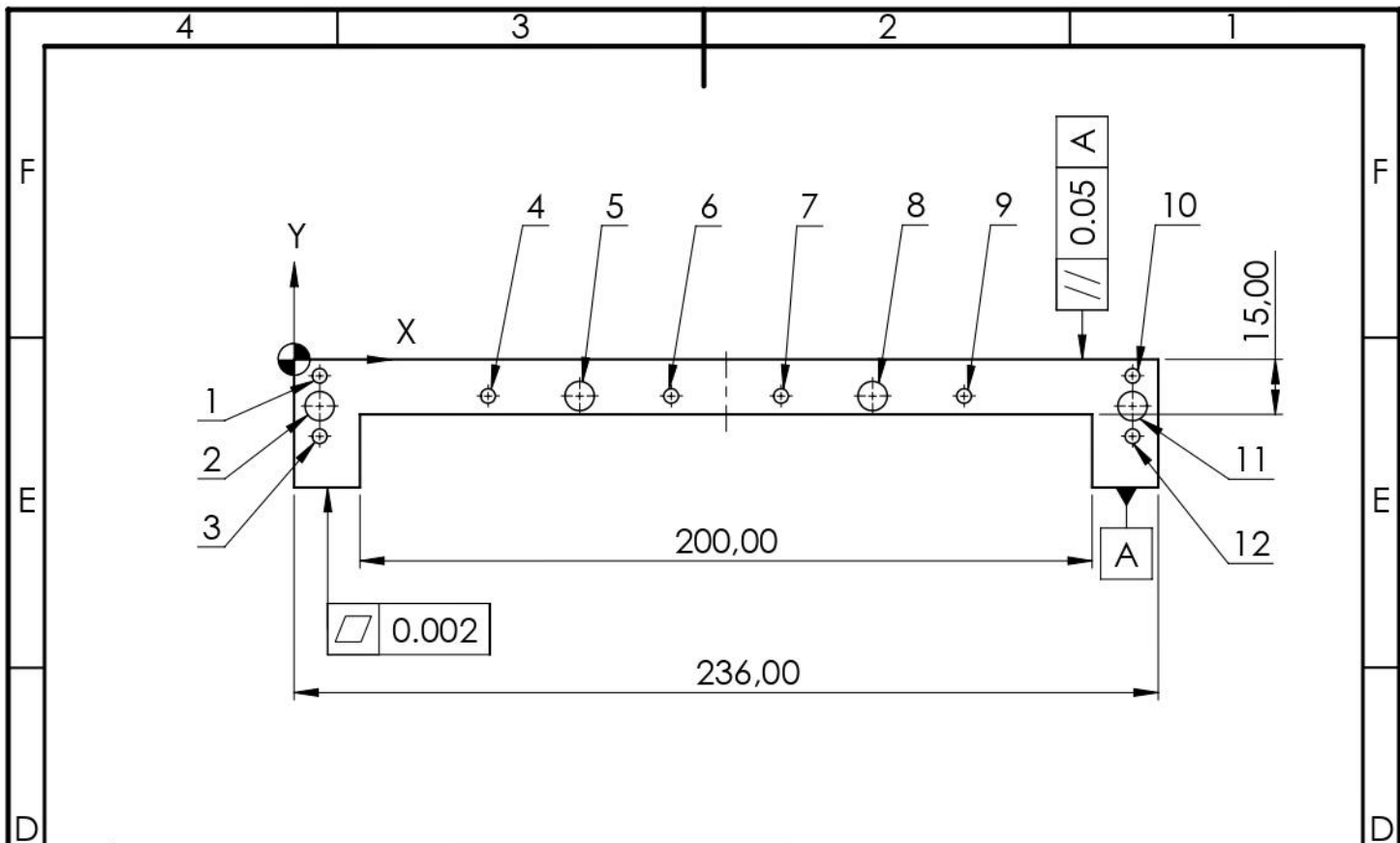
SECCIÓN A-A



DETALLE A
ESCALA 4 : 1

Nº	X (mm)	Y (mm)	Diámetro (mm)	Comentarios
1	7	4,5	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 9
2	7	12,75	8	M8 x 1.25 - H6
3	7	21	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 9
4	53	10	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 9
5	78	10	8	M8 x 1.25 - H6
6	103	10	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 9
7	118	19,15	6	M6 x 1 - H6 ∇ 6.35
8	133	10	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 9
9	158	10	8	M8 x 1.25 - H6
10	183	10	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 9
11	229	4,5	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 9
12	229	12,75	8	M8 x 1.25 - H6
13	229	21	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 9

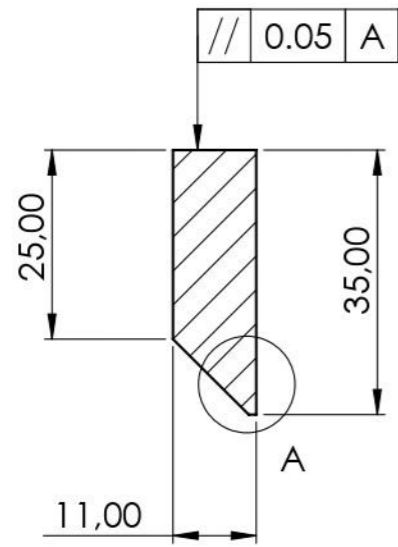
TEC TECNOLÓGICO DE COSTA RICA				ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA		REVISIÓN:
				DENOMINACIÓN:		A
				Matriz con manifold		
NOMBRE			FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	
DIBUJ. E.Barquero				27/05/22	N6	
VERIF. C.Otarola				27/05/22	MATERIAL:	
APROB.					AISI 304	
FABR.						
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:		PROYECTO:
		LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.5 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		mm		Slot Die Coater
		PESO: 965.33 gramos		UNIDADES: mm		ESCALA: 1:1
				HOJA 4 DE 18		FORMATO: A3



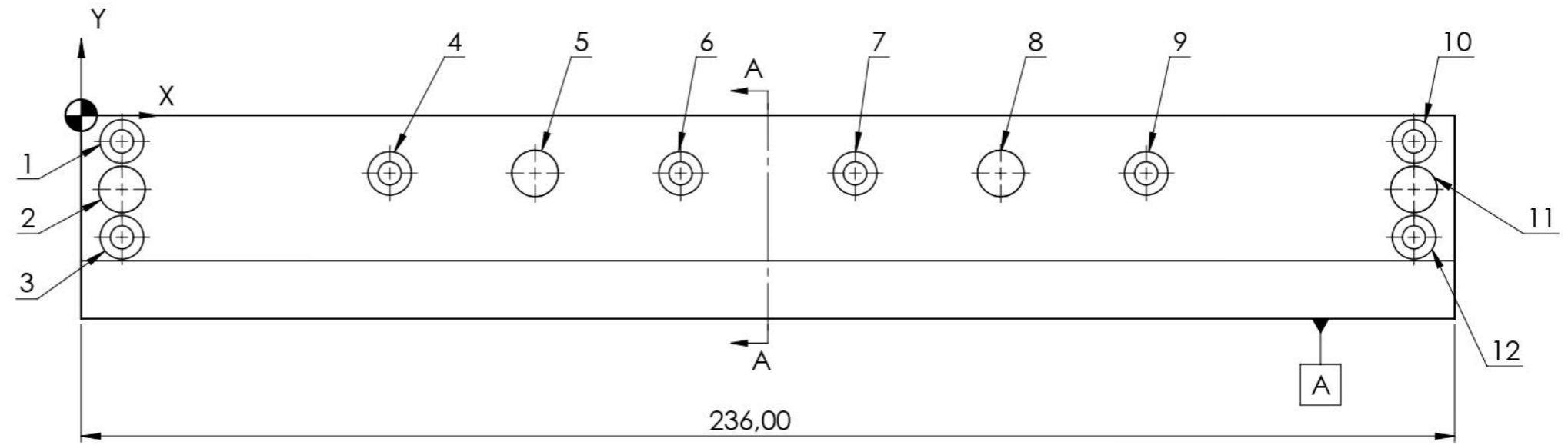
Nº	X (mm)	Y (mm)	Diámetro (mm)
1	7	4,5	4
2	7	12,75	8
3	7	21	4
4	53	10	4
5	78	10	8
6	103	10	4
7	133	10	4
8	158	10	8
9	183	10	4
10	229	4,5	4
11	229	12,75	8
12	229	21	4

Nota:
 -El espesor de este elemento es de 0.15 mm.
 - Las caras que son coincidentes con las matrices (TFG.EG.S1.01 y TFG.EG.S1.03) deben poseer una tolerancia de planicidad de 0.01 mm, cada una.
 -Todos los agujeros son pasantes.

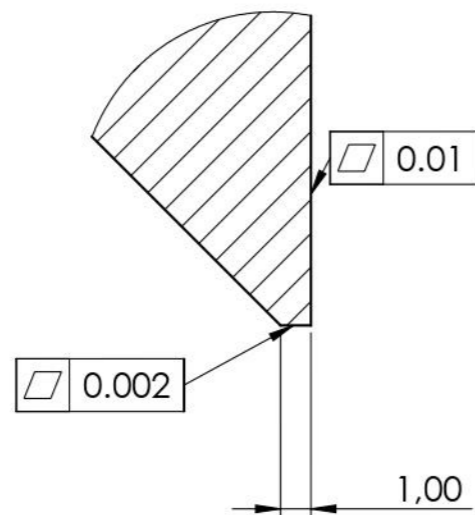
<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA		REVISIÓN:
				CURSO: Separador		A
NOMBRE: E. Barquero			ACABADO GENERAL: N6		PARTE: TFG.EG.S1.02	
FIRMA: C. Otarola			MATERIAL: AISI 302			
FECHA: 27/05/22			TOLERANCIA EN: mm			
TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.5 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°			PESO: 9.53 gramos			
SISTEMA:		PROYECTO: Slot Die Coater		ESCALA: 1:2		FORMATO: CARTA
		UNIDADES: mm		HOJA 5 DE 18		



SECCIÓN A-A

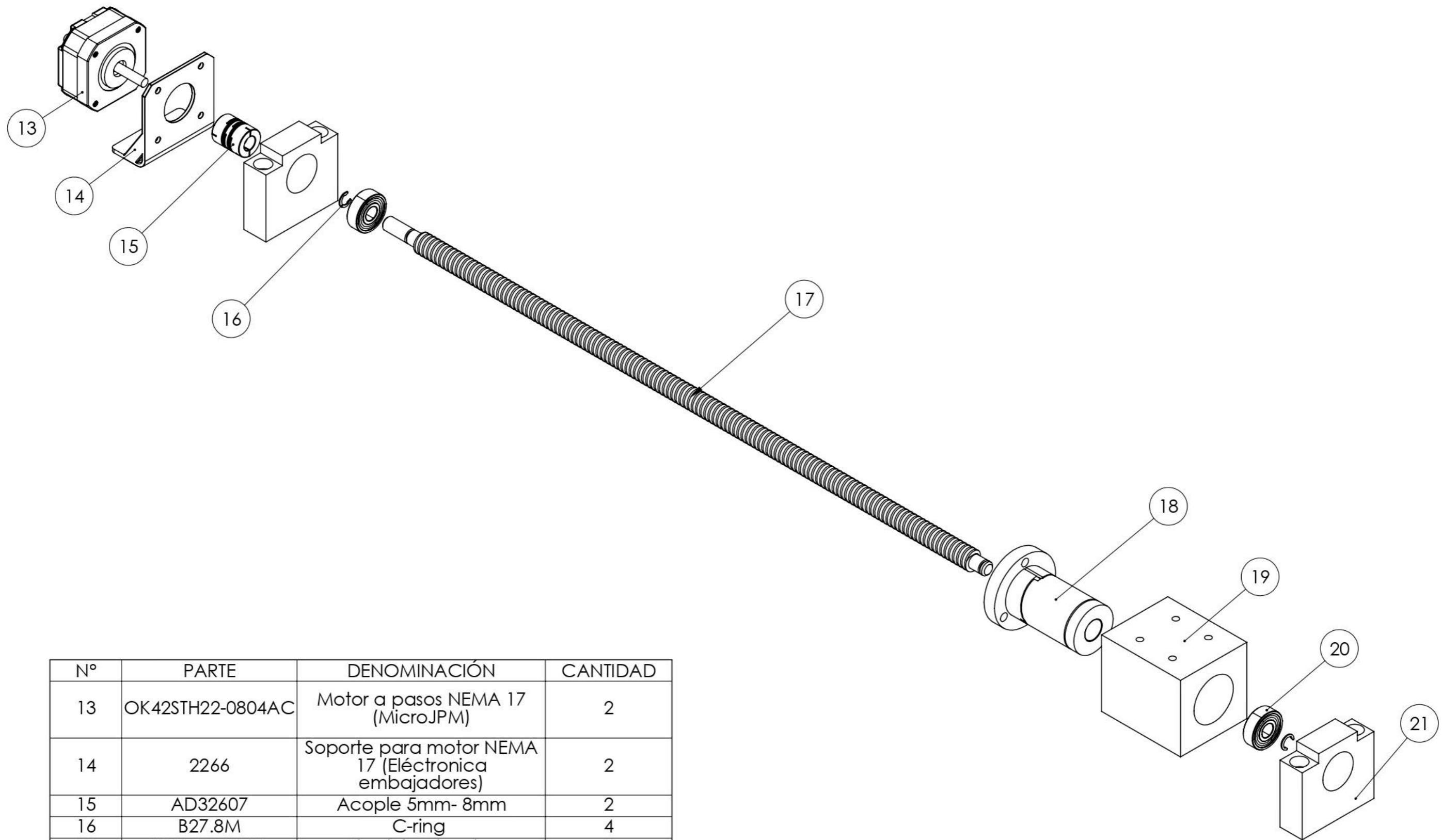


DETALLE A
ESCALA 4 : 1



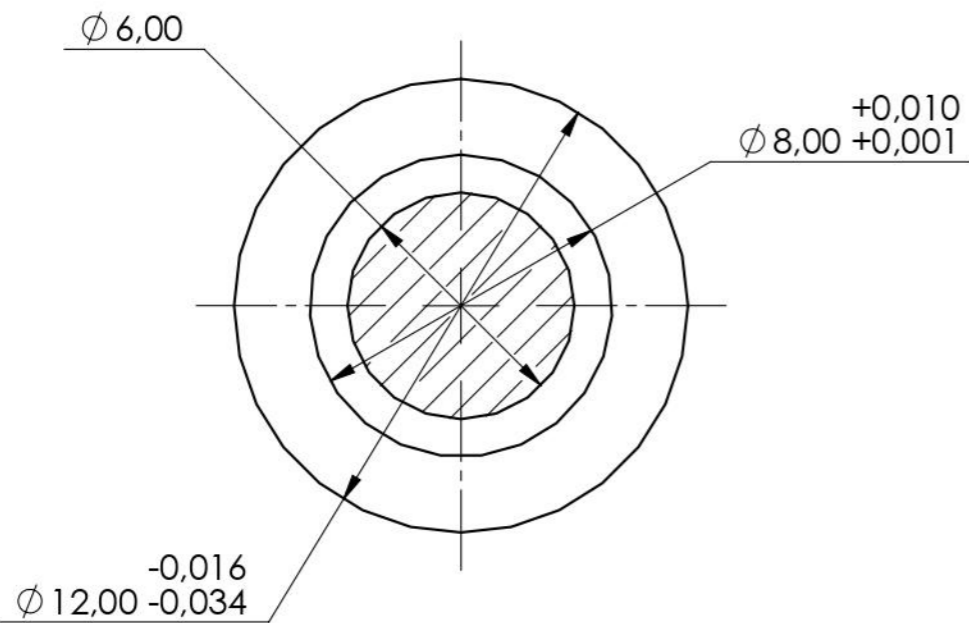
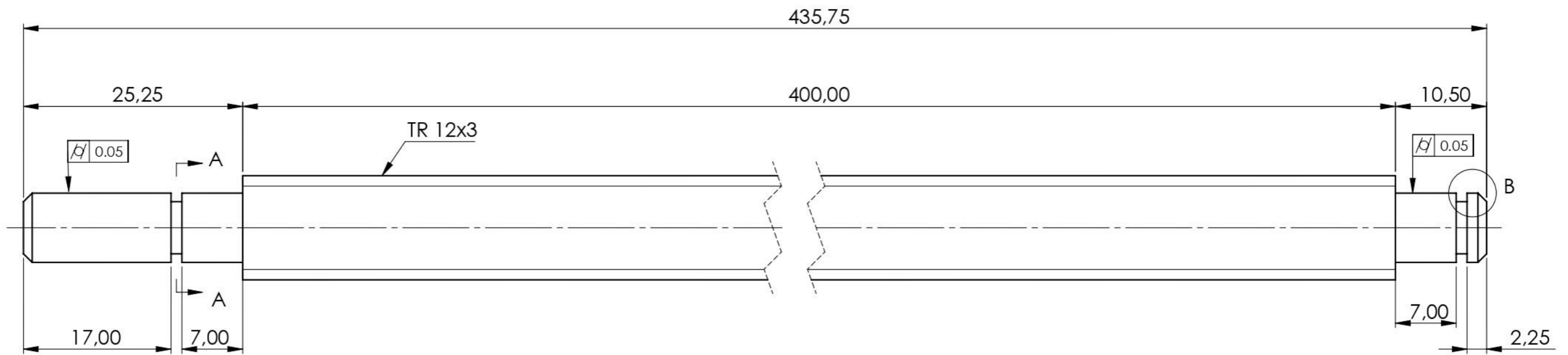
Nº	X (mm)	Y (mm)	Diámetro (mm)	Comentarios
1	7	4,5	4	M4 x 0.7 - H6 └─ ∅ 7.5 ▾ 4.5
2	7	12,75	8	M8 x 1.25 - H6
3	7	21	4	M4 x 0.7 - H6 └─ ∅ 7.5 ▾ 4.5
4	53	10	4	M4 x 0.7 - H6 └─ ∅ 7.5 ▾ 4.5
5	78	10	8	M8 x 1.25 - H6
6	103	10	4	M4 x 0.7 - H6 └─ ∅ 7.5 ▾ 4.5
7	133	10	4	M4 x 0.7 - H6 └─ ∅ 7.5 ▾ 4.5
8	158	10	8	M8 x 1.25 - H6
9	183	10	4	M4 x 0.7 - H6 └─ ∅ 7.5 ▾ 4.5
10	229	4,5	4	M4 x 0.7 - H6 └─ ∅ 7.5 ▾ 4.5
11	229	12,75	8	M8 x 1.25 - H6
12	229	21	4	M4 x 0.7 - H6 └─ ∅ 7.5 ▾ 4.5

TEC TECNOLÓGICO DE COSTA RICA				ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA		REVISIÓN:
				DENOMINACIÓN:		A
				Matriz sin manifold		
NOMBRE			FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	
DIBUJ. E.Barquero				27/05/22	N6	
VERIF. C.Otarola				27/05/22	PARTE:	
APROB.					TFG.EG.S1.03	
FABR.					MATERIAL:	
					AISI 304	
SISTEMA:			TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:
			LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.5 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		mm	Slot Die Coater
			PESO: 596,84 gramos		UNIDADES: mm	ESCALA: 1:1
					HOJA 6 DE 18	FORMATO A 3

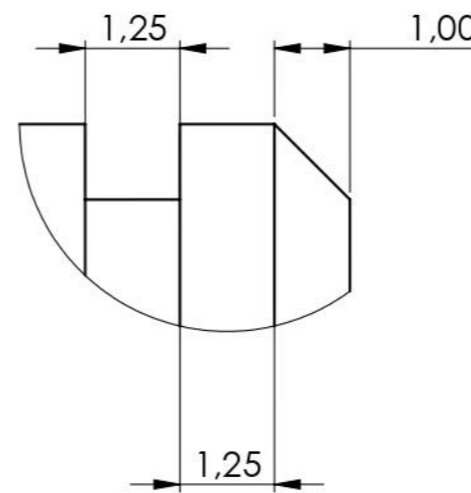


N°	PARTE	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
13	OK42STH22-0804AC	Motor a pasos NEMA 17 (MicroJPM)	2
14	2266	Soporte para motor NEMA 17 (Electronica embajadores)	2
15	AD32607	Acople 5mm- 8mm	2
16	B27.8M	C-ring	4
17	TFG.EG.S2.01	Eje del actuador	2
18	XCF12X3M	Tuerca con precarga (ThompsonLinear)	2
19	TFG.EG.S2.02	Carcasa de la tuerca	2
20	608-2RSH	Rodamiento rígido de bolas (SKF)	4
21	TFG.EG.S2.03	Soporte para rodamiento	4

TEC Tecnológico de Costa Rica				ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA		REVISIÓN:
				DENOMINACIÓN:		A
				Sub ensamblaje 2		
				PARTE:		
				TFG.EG.S2		
DIBUJ. E.Barquero		FIRMA		ACABADO GENERAL:		MATERIAL:
VERIF. C.Otarola		FECHA 27/05/22		NA		
APROB.				TOLERANCIA EN:		PROYECTO:
FABR.				NA		
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		PESO: -- gramos		UNIDADES: mm
		LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.5 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		ESCALA:		
				Slot Die Coater		FORMATO
				1:2		A3
				HOJA 7 DE 18		



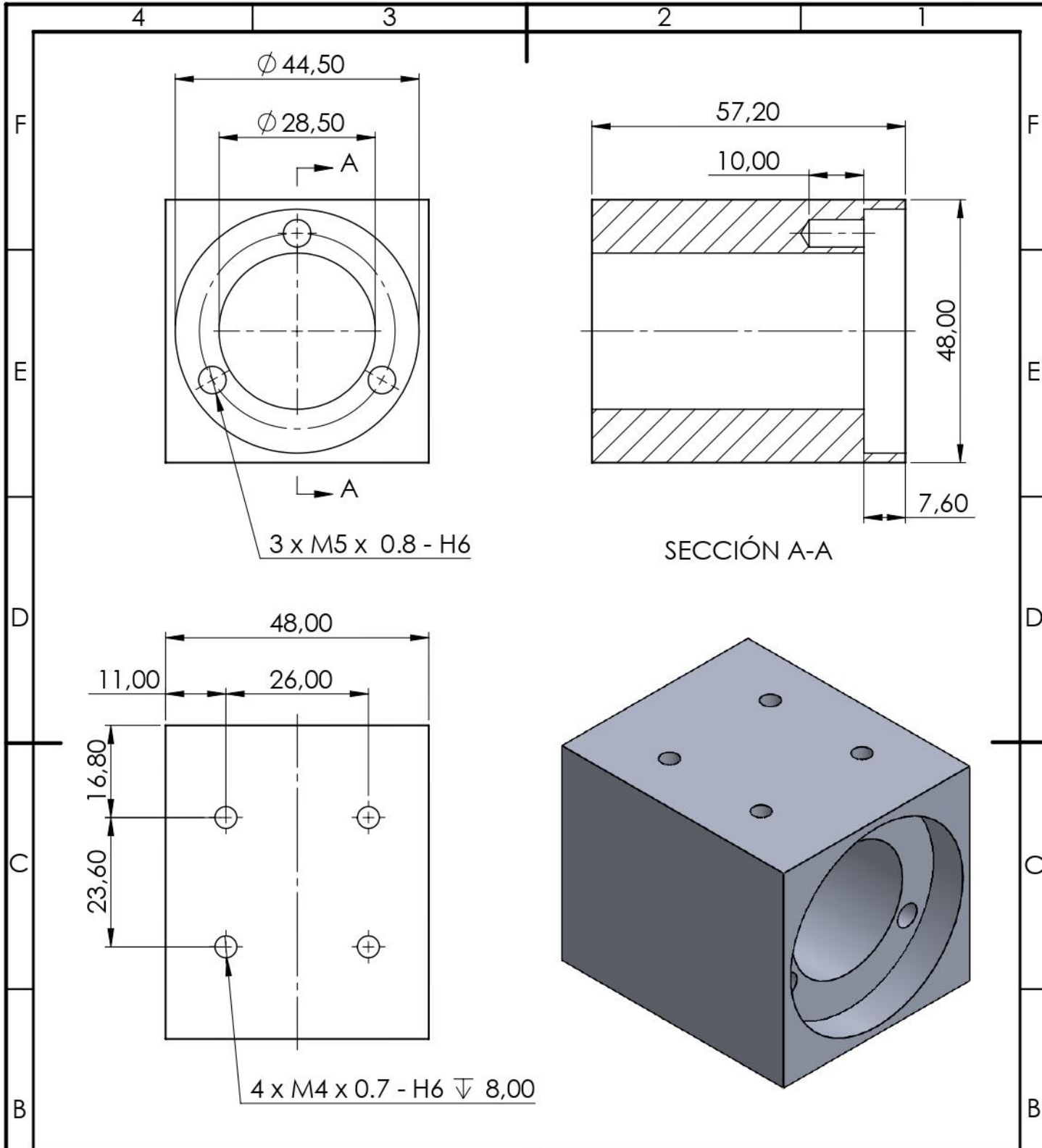
SECCIÓN A-A
ESCALA 5 : 1



DETALLE B
ESCALA 10 : 1

Dimensiones de TR 12 x 3	
Diámetro menor (dr)	8,5 mm
Diámetro promedio (dp)	10,415 mm
Diámetro nominal (dn)	12 mm
Ángulo de cuerda	15°
Avance (L)	3 mm
Paso (p)	3 mm

TEC Tecnológico de Costa Rica				ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA		REVISIÓN:
				DENOMINACIÓN:		A
ACABADO GENERAL:				PARTE:		
N6				TFG.EG.S2.01		
MATERIAL:				PROYECTO:		ESCALA:
AISI 304				SLOT DIE COATER		2:1
TOLERANCIAS:				PESO:		FORMATO:
LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.5 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°				287.87 GRAMOS		A3
SISTEMA:				UNIDADES:		HOJA 8 DE 18
				mm		



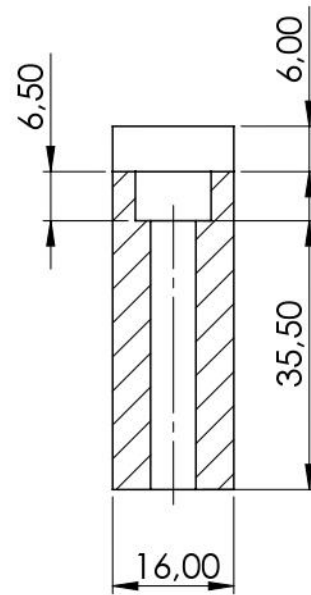
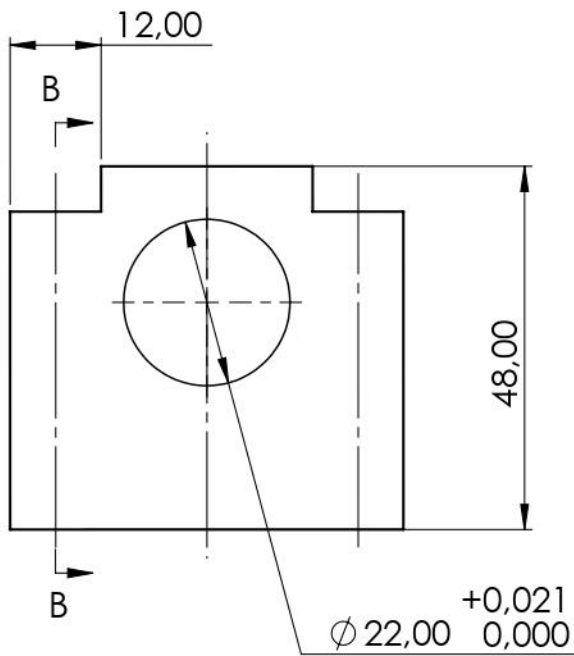
TEC | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA
 DENOMINACIÓN: CARCASA DE LA TUERCA
 REVISIÓN: **A**

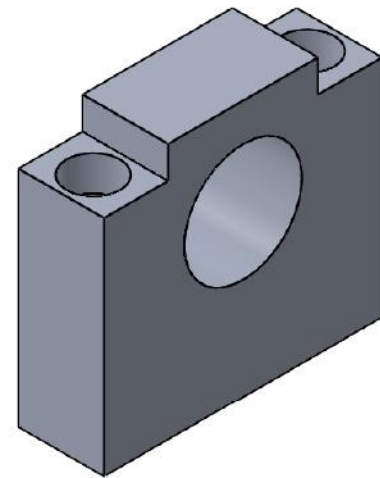
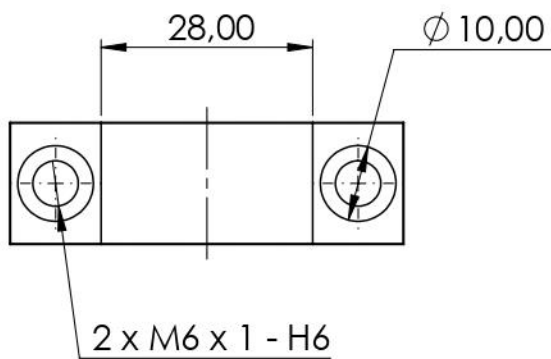
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	E.Barquero		27/05/22	N6
VERIF.	C.Otarola		27/05/22	
APROB.				MATERIAL:
FABR.				ALEACIÓN 6061

PARTE: TFG.EG.S2.02

SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO:
	LINEAL: X ± 0.25 .X ± 0.1 .XX ± 0.5 .XXX ± 0.010 ANGULAR: $\pm 0.1^\circ$	mm	SLOT DIE COATER	1:1	CARTA
	PESO: 265.67 GRAMOS		UNIDADES: mm	HOJA 9 DE 18	



SECCIÓN B-B



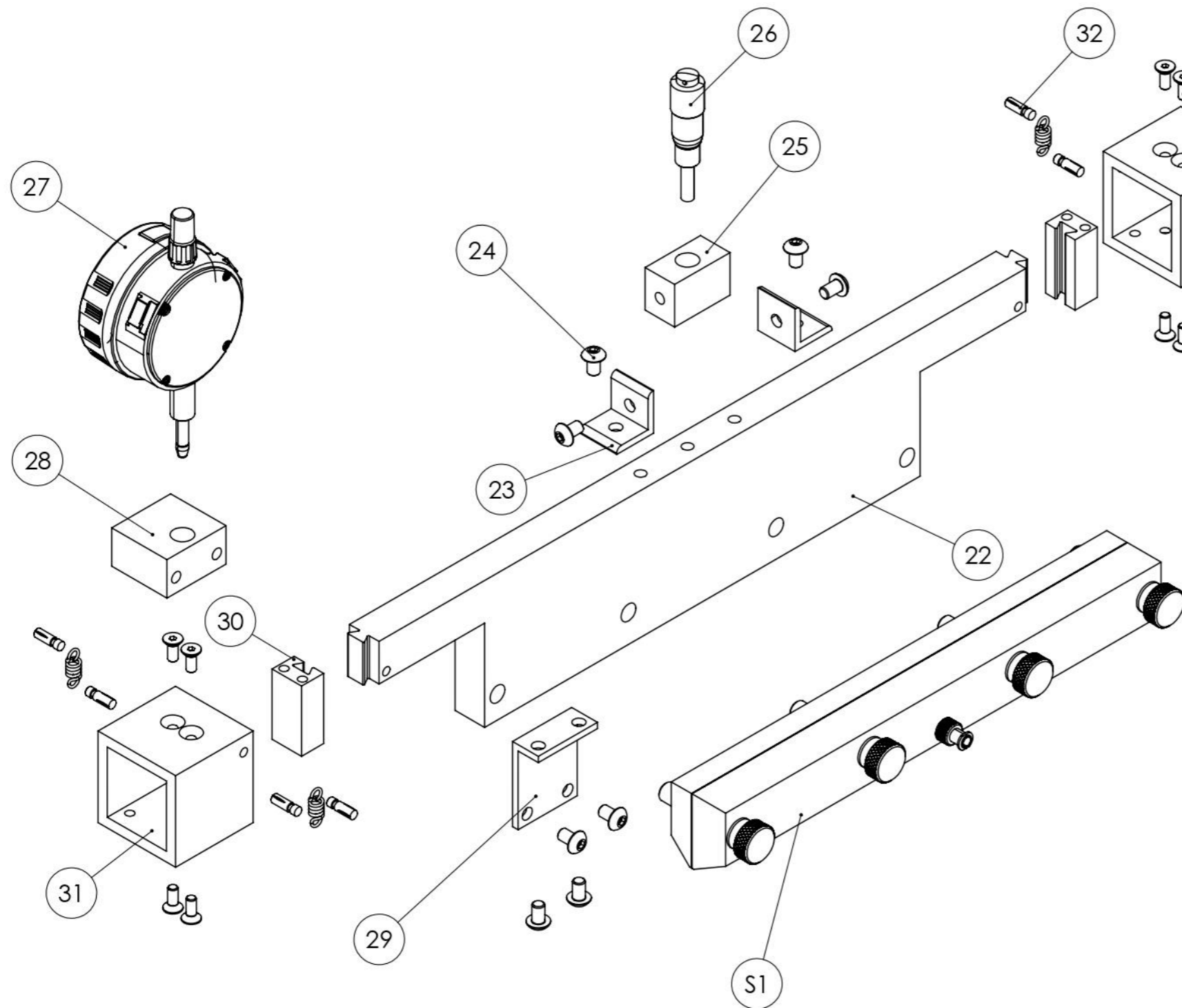
TEC | Tecnológico
de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA
DENOMINACIÓN:
Soporte para rodamiento

REVISIÓN:

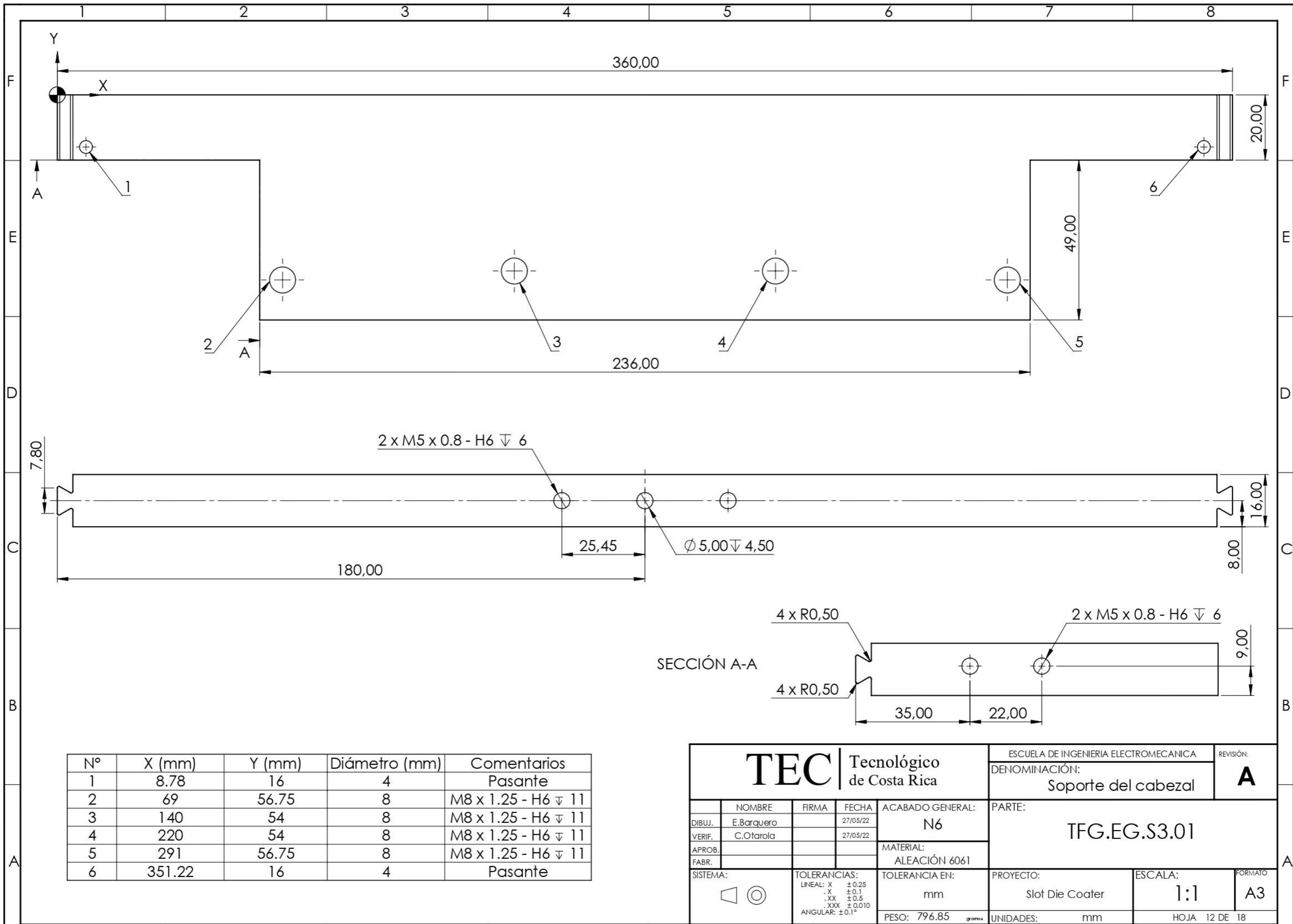
A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	PARTE:	
DIBUJ.	E.Barquero		27/05/22	N6	TFG.EG.S2.03	
VERIF.	C.Otarola		27/05/22	MATERIAL:		
APROB.				ALEACIÓN 6061		
FABR.						
SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO:
	LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.5 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		mm	Slot Die Coater	1:1	CARTA
	PESO:	UNIDADES:		HOJA 10 DE 18		
	77.01 gramos	mm				



Nº	PARTE	DENOMINACIÓN	CANTIDAD
S1	TFG.EG.S1	Sub ensamblaje 1	1
22	TFG.EG.S3.01	Soporte del cabezal	1
23	123819	Unión 90° 20mm x 20 mm (Novex)	2
24	B18.3.4M	Tornillo acero inoxidable M5 x 0.8 x 8	8
25	TFG.EG.S3.02	Soporte micrómetro	1
26	MITUTOYO 148-111	Tornillo micrométrico	1
27	MITUTOYO 543-302	Indicador de altura	1
28	TFG.EG.S3.03	Soporte indicador	1
29	TFG.EG.S3.04	Escuadra de unión	1
30	TFG.EG.S3.05	Guía del cabezal	2
31	TFG.EG.S3.06	Conexión cabezal-actuador	2
32	98400A365	Pin sujetador de resorte (McMaster-Carr)	4
33	B18.3.5M	Tornillo cabeza plana M4 x 0.7 x10	8
34	9065K585	Resorte de acero inoxidable (McMaster-Carr)	4

TEC Tecnológico de Costa Rica				ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA		REVISIÓN:	
				DENOMINACIÓN: Sub ensamblaje 3		A	
DIBUJ. E.Barquero VERIF. C.Otarola APROB. FABR.				ACABADO GENERAL: NA		PARTE: TFG.EG.S3	
SISTEMA: 		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 . X ±0.1 .XX ±0.5 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		TOLERANCIA EN: NA		PROYECTO: Slot Die Coater	
PESO: -- gramos				UNIDADES: mm		ESCALA: 1:2 HOJA 11 DE 18	
				FORMATO: A3			



2 x M5 x 0.8 - H6 ∇ 6

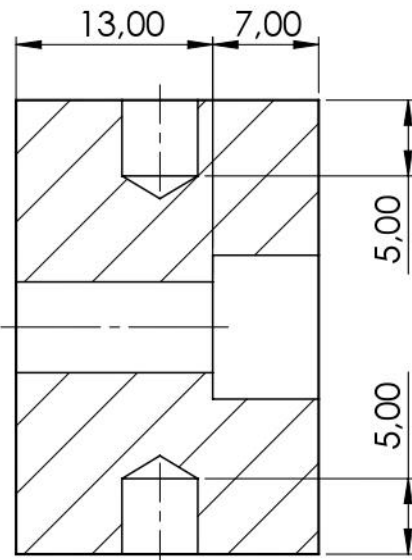
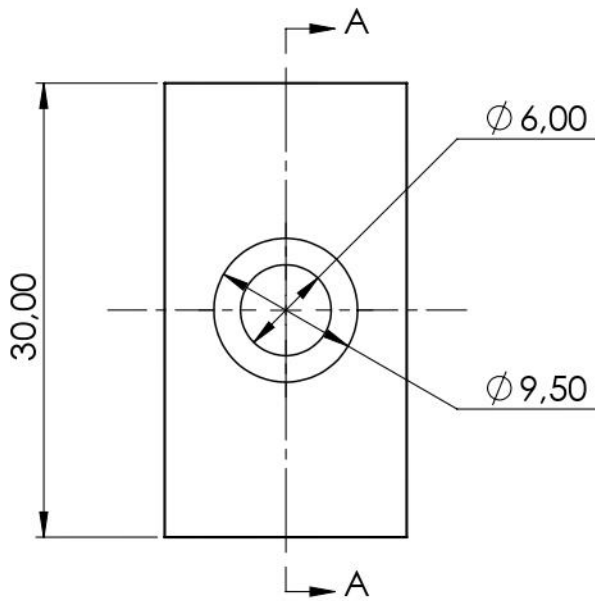
∅ 5,00 ∇ 4,50

SECCIÓN A-A

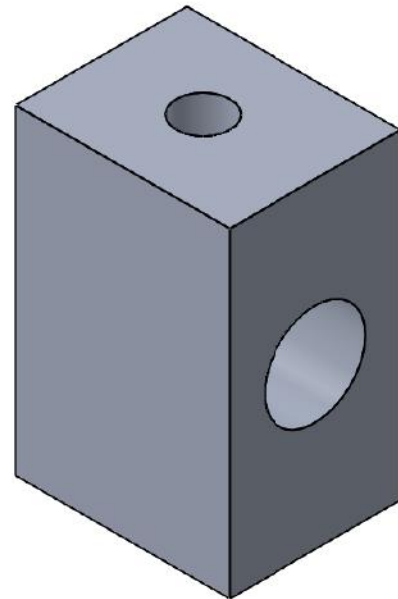
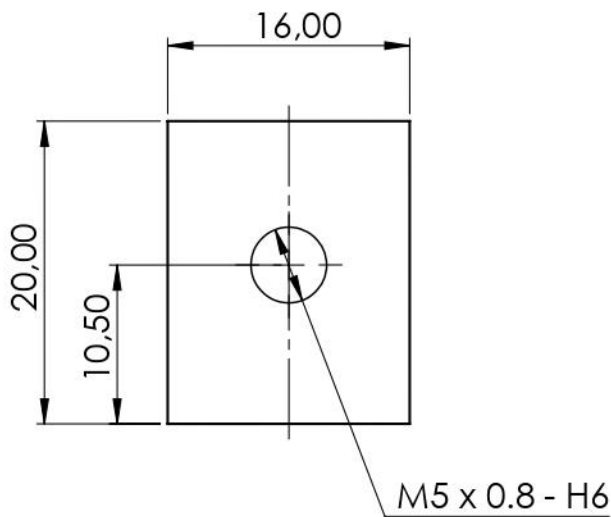
2 x M5 x 0.8 - H6 ∇ 6

N°	X (mm)	Y (mm)	Diámetro (mm)	Comentarios
1	8.78	16	4	Pasante
2	69	56.75	8	M8 x 1.25 - H6 ∇ 11
3	140	54	8	M8 x 1.25 - H6 ∇ 11
4	220	54	8	M8 x 1.25 - H6 ∇ 11
5	291	56.75	8	M8 x 1.25 - H6 ∇ 11
6	351.22	16	4	Pasante

TEC Tecnológico de Costa Rica				ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA		REVISIÓN:
				DENOMINACIÓN:		A
				Soporte del cabezal		
				PARTE:		
				TFG.EG.S3.01		
DIBUJ. E.Barquero		FIRMA		ACABADO GENERAL:		MATERIAL:
VERIF. C.Otarola		FECHA 27/05/22		N6		
APROB.				TOLERANCIA EN:		PROYECTO:
FABR.				mm		
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		PESO: 796.85 gramos		UNIDADES: mm
		LINEAL: X ±0.25 X ±0.1 .XX ±0.5 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		ESCALA: 1:1		
				FORMATO: A3		HOJA 12 DE 18



SECCIÓN A-A



TEC | Tecnológico de Costa Rica

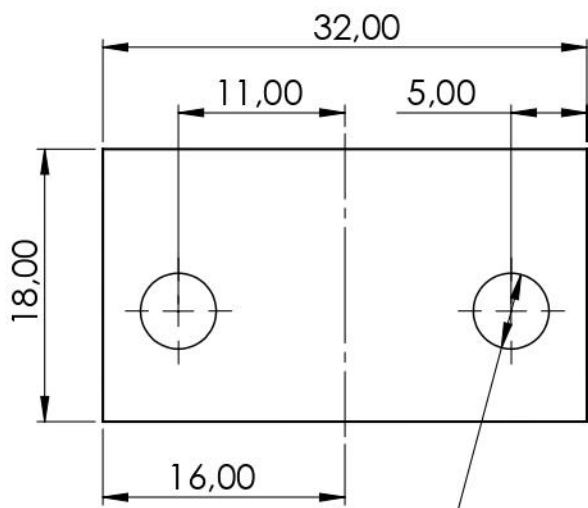
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA
DENOMINACIÓN: Soporte micrómetro

REVISIÓN: **A**

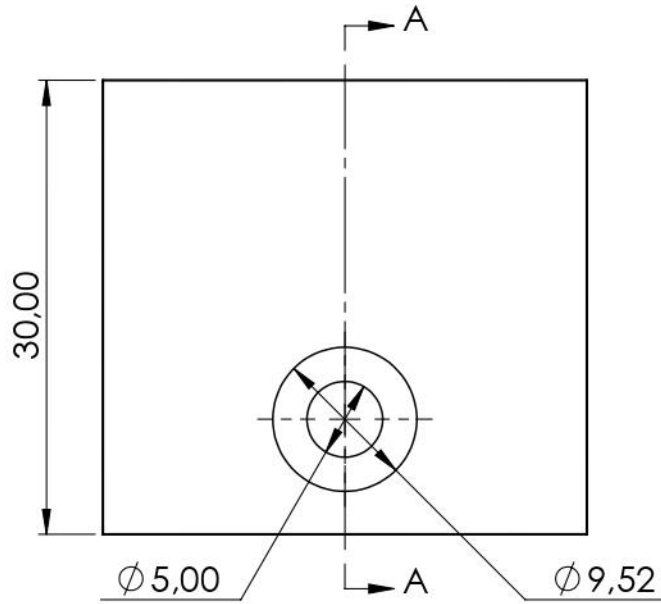
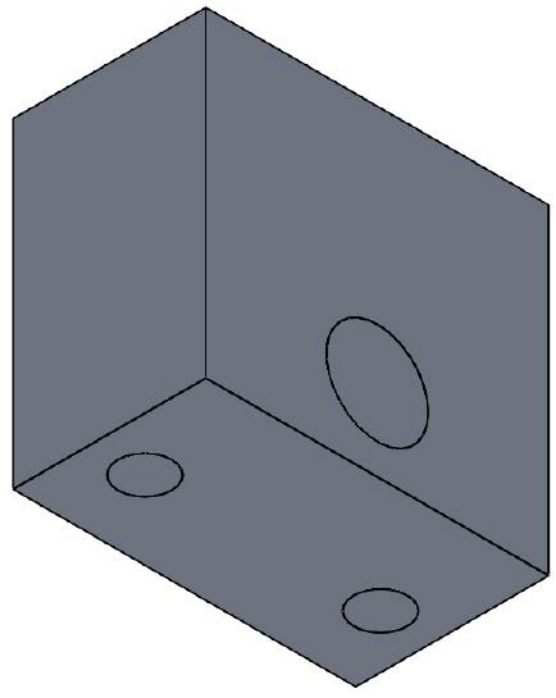
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	E.Barquero		27/05/22	N6
VERIF.	C.Otarola		27/05/22	
APROB.				MATERIAL:
FABR.				ALEACIÓN 6061

PARTE: TFG.EG.S3.02

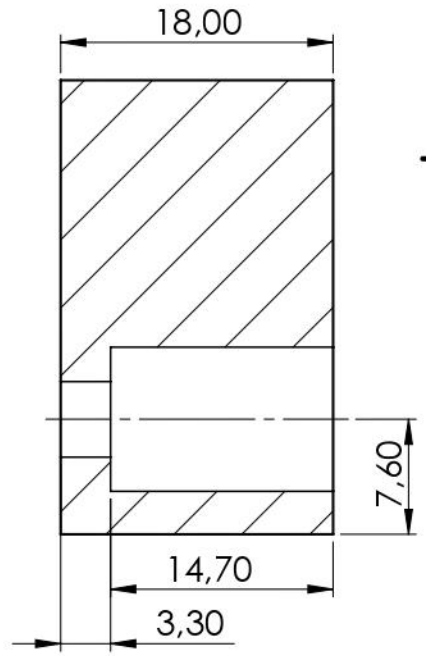
SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO:
	LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.5 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°	mm	Slot Die Coater	2:1	CARTA
	PESO: 23 gramos	UNIDADES: mm	HOJA 13 DE 18		



2 x M5 x 0.8 - H6 ∇ 6,00



SECCIÓN A-A



TEC | Tecnológico de Costa Rica

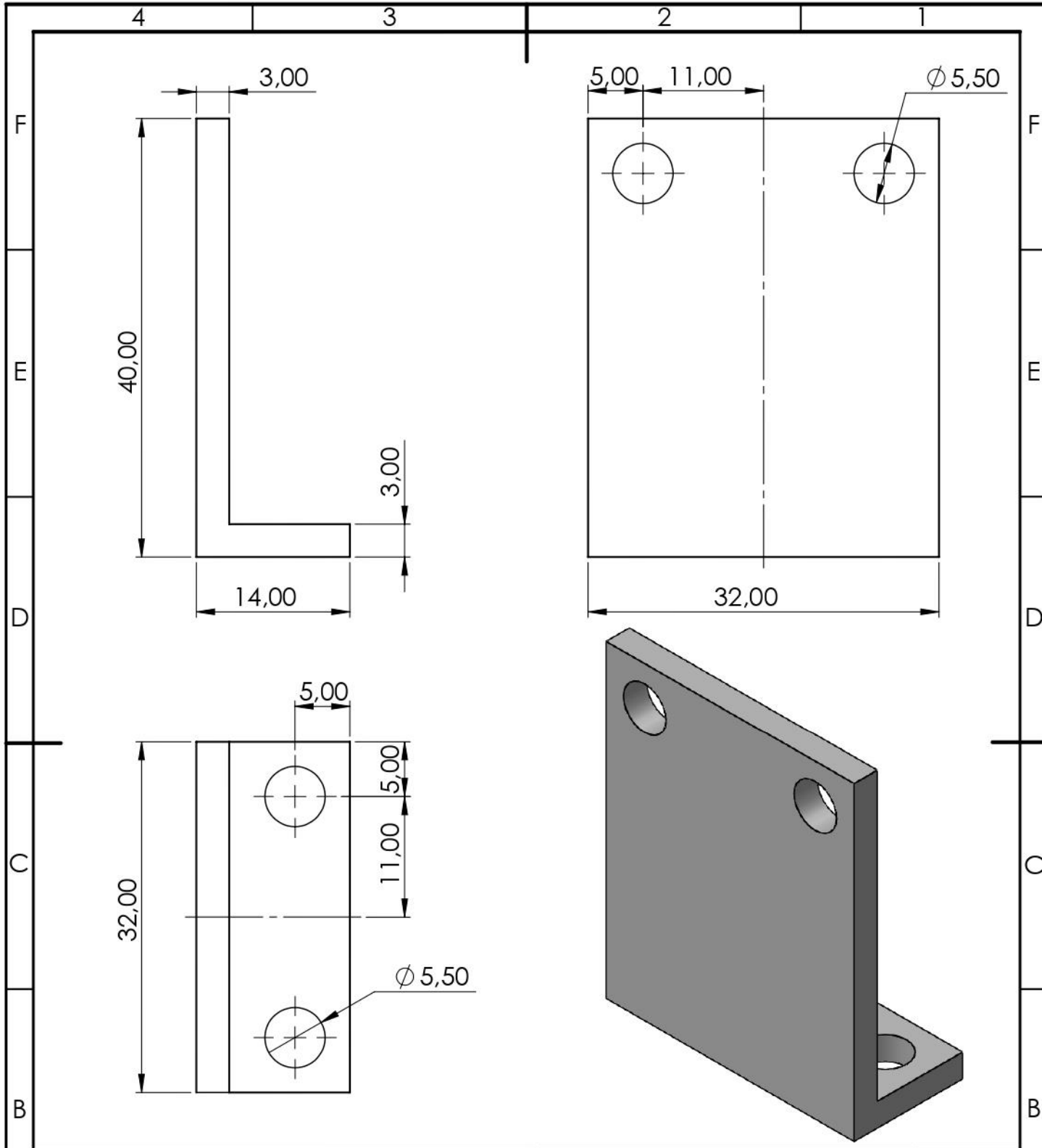
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA
DENOMINACIÓN: Soporte Indicador

REVISIÓN: **A**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	E.Barquero		27/05/22	N6
VERIF.	C.Otarola		27/05/22	
APROB.				MATERIAL:
FABR.				ALEACIÓN 6061

PARTE: TFG.EG.S3.03

SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.5 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°	TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO: Slot Die Coater	ESCALA: 2:1	FORMATO: CARTA
	PESO: 42.97 gramos	UNIDADES: mm	HOJA 14 DE 18		



TEC | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA
 DENOMINACIÓN: Escuadra de unión

REVISIÓN:
A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	E.Barquero		27/05/22	N6
VERIF.	C.Otarola		27/05/22	
APROB.				MATERIAL:
FABR.				ALEACIÓN DE ZINC

PARTE:
TFG.EG.S3.04

SISTEMA:

TOLERANCIAS:

LINEAL: X	±0.25
.X	±0.1
.XX	±0.5
.XXX	±0.010
ANGULAR: ±0.1°	

TOLERANCIA EN:

mm

PESO: 30.89 gramos

PROYECTO:

Slot Die Coater

UNIDADES: mm

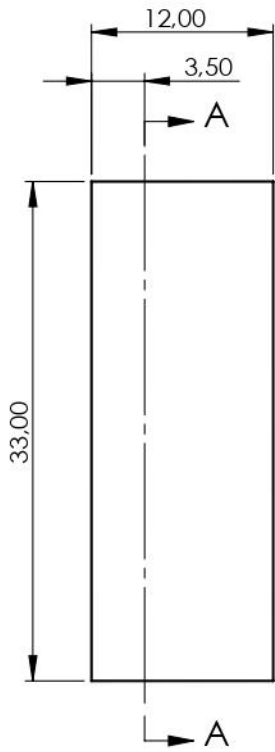
ESCALA:

2:1

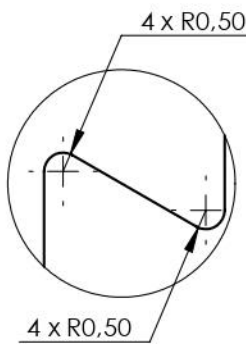
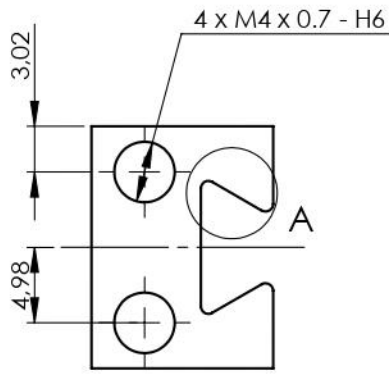
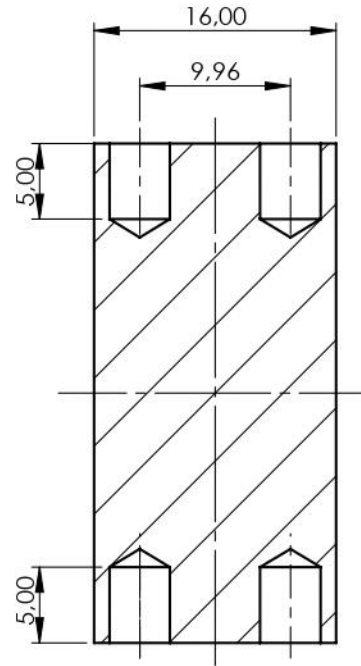
HOJA 15 DE 18

FORMATO:

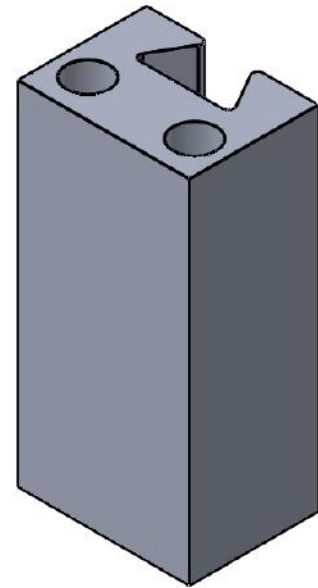
CARTA



SECCIÓN A-A



DETALLE A
ESCALA 5 : 1



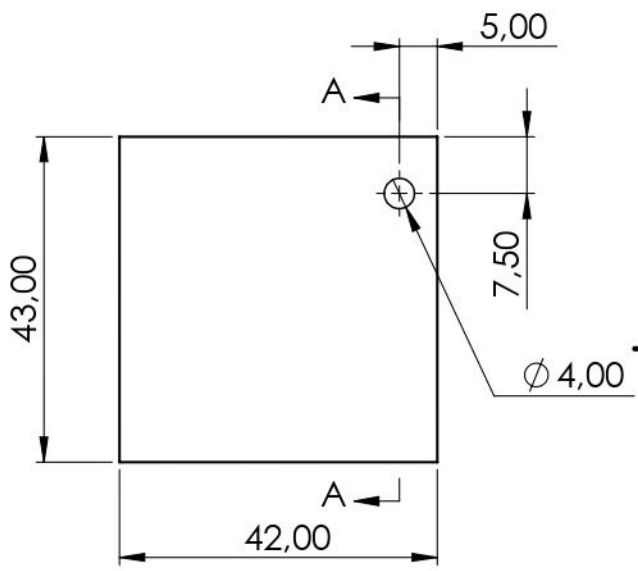
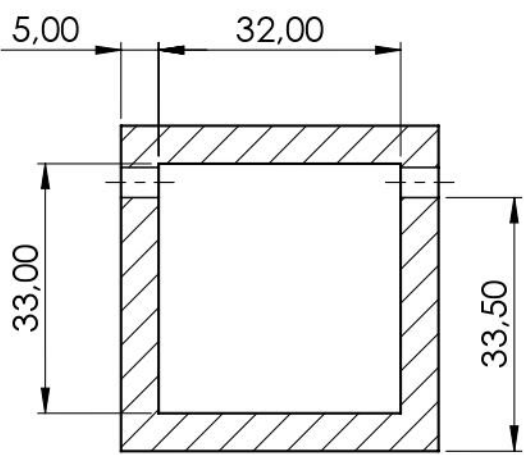
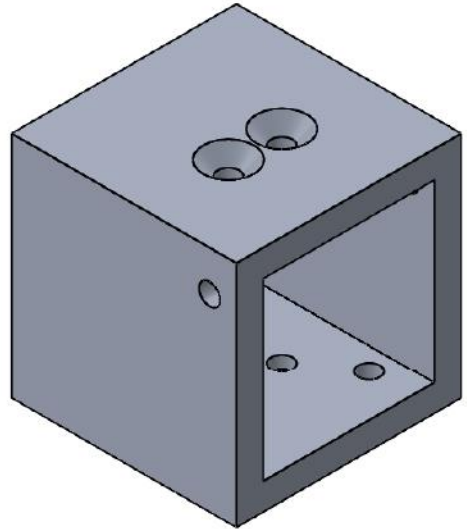
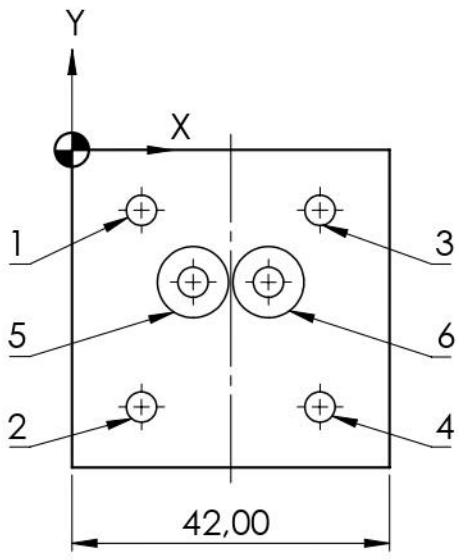
TEC | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA
CURSO: Guía del cabezal

REVISIÓN:
A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	PARTE:
DIBUJ.	E.Barquero		27/05/22	N6	TFG.EG.S3.05
VERIF.	C.Otarola		27/05/22		
APROB.				MATERIAL:	
FABR.				ALEACIÓN 6061	

SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO:
	LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.5 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°	mm	Slot Die Coater	2:1	CARTA
	PESO: 13.5 gramos	UNIDADES: mm		HOJA 16 DE 18	



SECCIÓN A-A

Nº	X (mm)	Y (mm)	Diámetro (mm)	Comentarios
1	9.20	8	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 5
2	9.20	34	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 5
3	32.80	8	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 5
4	32.80	34	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 5
5	16.02	17.50	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 5 \surd ϕ 9.40 x 90°
6	25.98	17.50	4	M4 x 0.7 - H6 ∇ 5 \surd ϕ 9.40 x 90°

TEC | Tecnológico de Costa Rica

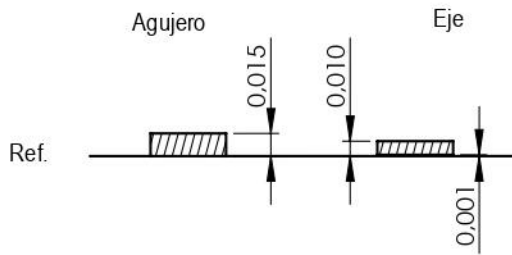
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA
DENOMINACIÓN:
Conexión cabezal - actuador

REVISIÓN:
A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	PARTE:
DIBUJ.	E.Barquero		27/05/22	N6	TFG.EG.S3.06
VERIF.	C.Otarola		27/05/22		
APROB.				MATERIAL:	
FABR.				ALEACIÓN 6061	

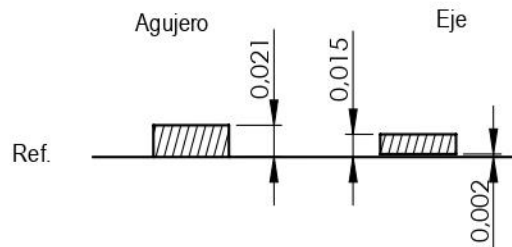
SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: X \pm 0.25 .X \pm 0.1 .XX \pm 0.5 .XXX \pm 0.010 ANGULAR: \pm 0.1°	TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO: Slot Die Coater	ESCALA: 1:1	FORMATO: CARTA
	PESO: 82.64 gramos	UNIDADES: mm	HOJA 17 DE 18		

Rodamiento 608-2RSH - Eje ϕ 8 mm H7 / k6



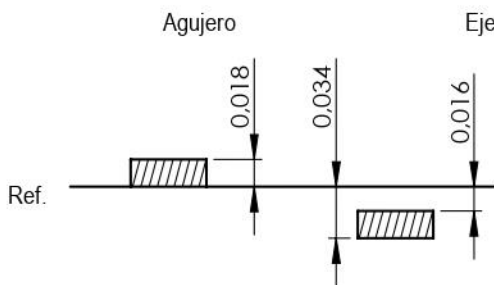
Límite superior : 8,015 mm / 8,010 mm
 Límite Inferior : 8 mm / 8,001 mm
 Calidades : IT7 e IT6
 Medida Nominal : 8 mm
 Tipo de Ajuste : Indeterminado
 Jmáx : 0,014 mm Jmín: -0,010 mm

Soporte - Rodamiento 608-2RSH H7 / k6



Límite superior : 22,021 mm / 22,015 mm
 Límite Inferior : 22 mm / 22,002 mm
 Calidades : IT7 e IT6
 Medida Nominal : 22 mm
 Tipo de Ajuste : Indeterminado
 Jmáx : 0,019 mm Jmín: -0,015 mm

Tuerca XCF12X3M - Eje ϕ 12 mm H7 / f7



Límite superior : 12,018 mm / 11,984 mm
 Límite Inferior : 12 mm / 11,966 mm
 Calidades : IT 7
 Medida Nominal : 12 mm
 Tipo de Ajuste : Juego
 Jmáx : 0,052 mm Jmín: 0,016 mm

TEC | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA

REVISIÓN:

DENOMINACIÓN:

Ajustes

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	E. Barquero		27/05/22	NA
VERIF.	C. Otárola		27/05/22	
APROB.				MATERIAL:
FABR.				NA

PARTE:	<h1>Ajustes</h1>
PROYECTO:	

SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO:
	LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.5 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°	mm	Slot Die Coater	200:1	CARTA
	PESO: - gramos	UNIDADES: mm	HOJA 18 DE 18		