

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA SPRAY PIRÓLISIS
CONTROLADO POR LABVIEW

JUAN FELIPE PINTO GÓMEZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERIA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2018

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA SPRAY PIRÓLISIS
CONTROLADO POR LABVIEW

JUAN FELIPE PINTO GÓMEZ

Proyecto de investigación para optar el título de
INGENIERO MECÁNICO

Director
Dr. Sc. César Augusto Quiñones Segura
Químico

Codirector
Miguel Alfonso Morales Granados
Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2018

Aceptación (Dirección de Investigación)

Firma docente Investigador

Firma Docente Jurado 1

Firma Docente Jurado 2

Bogotá D.C Marzo de 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrector Académico y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano general Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director de Investigaciones

Ing. ARMANDO FERNÁNDEZ CÁRDENAS

Director del Departamento de Ingeniería Mecánica

Ing. CARLOS MAURICIO VELOZA VILLAMIL

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

DEDICATORIA

Este trabajo realizado va dedicado a toda mi familia en especial a mi bisabuela, a mi novia y amigos; quienes siempre creyeron en mis capacidades y aún en medio de todas las dificultades estuvieron apoyándome de una u otra manera, depositando su confianza y llenándome de fuerzas para alcanzar este primer logro de muchos que vendrán.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios por darme las fuerzas, la paz y la sabiduría para realizar todo lo necesario para el proyecto; a mi familia y novia por su apoyo incondicional y su amor que me impulsa. Agradezco al grupo de investigación de Materiales Fotoactivos dirigido por Dr. Sc. Cesar Augusto Quiñones Segura y al profesor Miguel Morales por todo su apoyo y confianza; de igual manera agradezco a la empresa ACONAIRE S.A.S por abrir sus puertas para permitirme desarrollar proyectos en sus instalaciones y finalmente agradezco a cada una de las personas que intervinieron de alguna forma en alcanzar este logro a lo largo de la carrera, Dios los bendiga grandemente a todos.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS	20
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
1.1 PELÍCULAS DELGADAS	21
1.1.1 Óxidos transparentes conductores	21
1.1.2 El FTO	22
1.2 MÉTODOS DE DEPOSICIÓN SOBRE PELÍCULAS DELGADAS	23
1.2.1 Spray pirólisis	23
1.3 LAZOS DE CONTROL	27
1.3.1 Control PID	28
1.4 ADQUISICIÓN DE DATOS	29
1.4.1 Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW)	30
1.5 RESISTENCIAS DE CALENTAMIENTO	31
1.6 SOLDADURA TIG	31
2. DISEÑO CONCEPTUAL Y PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS	33
2.1 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS	33
2.1.1 Estructura	33
2.1.2 Dispositivo de calentamiento	35
2.1.3 Aislamiento	35
2.1.4 Termocupla	36
2.1.5 Movimiento	37
2.1.6 Sistema de flujo de fluidos	38
3. DISEÑO DETALLADO DEL SISTEMA SPRAY PIRÓLISIS	40
3.1 CÁLCULO DEL COMPRESOR	40
3.2 SELECCIÓN DE POLEA-CORREA	42
3.3 SELECCIÓN DEL MOTOR	44
3.4 SELECCIÓN DE LA BOMBA	48
3.5 DISEÑO ESTRUCTURAL	49
3.5.1 Ensamble sistema de aspersion	51
3.5.2 Ensamble módulo fijo	53
3.6 SOLDADURA	57
3.7 ANÁLISIS DE COMPONENTES POR ELEMENTOS FINITOS	58
3.7.1 Análisis desplazamiento línea guía	59
3.7.2 Análisis de esfuerzo elemental nodal de la línea guía	60
3.7.3 Análisis de desplazamiento en la estructura	61
3.7.4 Análisis de esfuerzo elemental nodal en la estructura	62
3.7.5 Análisis de desplazamiento en el bloque del aspersor	63

3.7.6	Análisis esfuerzo elemental nodal en el bloque del aspersor	64
3.7.7	Análisis térmico del bloque de calentamiento	65
4.	DESARROLLO DE SOFTWARE	67
4.1	CONTROL DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO	67
4.2	CONTROL SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO Y ASPERSIÓN	70
5.	RESULTADOS	73
5.1	RESULTADO CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA SPRAY PIRÓLISIS	73
5.2	FORMACIÓN DE PELÍCULAS DE SnO ₂ : F	75
5.2.1	Síntesis de películas de SnO ₂ : F	75
5.2.2	Películas obtenidas	76
6.	MANUALES	78
6.1	MANUAL DE OPERACIÓN	78
6.1.1	Conexiones	78
7.	CONCLUSIONES	81
8.	RECOMENDACIONES	82
	BIBLIOGRAFÍA	83
	ANEXOS	87

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características de distintos métodos de deposición y su diferenciación.	24
Tabla 2. Especificaciones de motores NEMA17.	48
Tabla 3. Propiedades del material de las estructuras.	58
Tabla 4. Tamaños de malla utilizados en líneas guía	59
Tabla 5. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón	69
Tabla 6. Resultados obtenidos en pruebas preliminares	76
Tabla 7. Pines del driver Pololu A4988.	80

LISTA DE CUADROS

		pág.
Cuadro 1	Parámetros de funcionamiento del spray pirólisis	33
Cuadro 2	Características de aislamientos térmicos	36
Cuadro 3	Voltajes de alimentación	78

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Cantidad de publicaciones de spray pirólisis	19
Figura 2. Diagrama esquemático del proceso de Spray Pirólisis	26
Figura 3. Dispositivo myDAQ para adquisición de datos	30
Figura 4. Diseño conceptual de la estructura	35
Figura 5. Compresor de único pistón	38
Figura 6. Principio de trabajo de la bomba peristáltica e imagen de la bomba	39
Figura 7. Nomograma para determinar tipo de compresor	41
Figura 8. Montaje de motor, polea y correa	42
Figura 9. Vista superior y explosionada de estructura	50
Figura 10. Despiece de las estructuras	51
Figura 11. Ensamble bloques de los ejes.	52
Figura 12. Ensamble bloque de aspersión y ejes verticales.	52
Figura 13. Ensamble de eje y tensor de polea	53
Figura 14. Ensamble de estructura interna y aislamiento	54
Figura 15. Ensamble del sistema de aspersión en la estructura.	54
Figura 16. Unión del sistema de aspersión y base del motor a la estructura.	55
Figura 17. Ensamble del motor y la correa	55
Figura 18. Ensamble de la resistencia y aspensor.	56
Figura 19. Ensamble de la puerta y tapa superior	56
Figura 20. Ensamble final del sistema de spray pirólisis	57
Figura 21. Esquema de los puntos de soldadura	57
Figura 22. Soldadura TIG en uniones de la estructura externa	58
Figura 23. Carga aplicada y restricciones de la línea guía	60
Figura 24. Resultado de desplazamiento en la línea guía	60
Figura 25. Resultados esfuerzo elemental nodal en la línea guía.	61
Figura 26. Resultado de desplazamiento en la estructura	62
Figura 27. Resultados del esfuerzo elemental nodal en la estructura.	62
Figura 28. Resultado de desplazamiento en el bloque del aspensor	63
Figura 29. Resultado del esfuerzo elemental nodal en el bloque del aspensor	64
Figura 30. Mallado de bloque de calentamiento	65
Figura 31. Simulación de calentamiento en estado transitorio	66
Figura 32. Esquema del lazo de control implementando PID	67
Figura 33. Curva de respuesta en forma de S	68
Figura 34. Diagrama de bloques aplicando las constantes del controlador	69
Figura 35. Panel frontal del sistema PID implementado	70
Figura 36. Panel frontal para control de los dispositivos	71
Figura 37. Diagrama de bloques de los dispositivos	72
Figura 38. Montaje final del sistema con todos los dispositivos	73
Figura 39. Bloque de la resistencia infrarroja	73
Figura 40. Ensamble de bloque de aspensor en la estructura	74
Figura 41. Montaje final del sistema sin tarjeta electrónica	74

Figura 42. Procedimiento de preparación de SnO ₂ : F	75
Figura 43. Muestras de pruebas preliminares de obtención de películas	76
Figura 44. Diagrama de conexiones de la myDAQ	79
Figura 45. Dispositivo driver POLOLU A4988	80

LISTA DE ECUACIONES

		pág.
Ecuación 1	Ecuación general de un controlador PID	29
Ecuación 2	Ecuación simplificada de un controlador PID	29
Ecuación 3	Relación de compresión	40
Ecuación 4	Caudal del compresor	40
Ecuación 5	Longitud de la correa.	43
Ecuación 6	Velocidad de la correa	43
Ecuación 7	Inercia total	44
Ecuación 8	Inercia de poleas	45
Ecuación 9	Inercia de carga	45
Ecuación 10	Torque de aceleración	45
Ecuación 11	Torque de resistencia	46
Ecuación 12	Cálculo Fuerza total	46
Ecuación 13	Torque total	47
Ecuación 14	Caudal de solución.	49
Ecuación 15	Cálculo de área	49
Ecuación 16	Factor de seguridad	59
Ecuación 17	Cálculo de constantes del PID	69

LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo A. Propiedades de materiales metálicos	88
Anexo B. Especificaciones de resistencia cerámica infrarroja	89
Anexo C. Propiedades de manta cerámica	90
Anexo D. Análisis del sistema de movimiento del spray	91
Anexo E. Partes del aerógrafo doble efecto	92
Anexo F. Selección de correa dentada	93
Anexo G. Tabla de conversión de termocupla tipo k	94
Anexo H. Plano final del bloque de aspersion	95
Anexo I. Plano ensamble final	96
Anexo J. Protocolo de lavado de vidrios	97

LISTA DE ABREVIATURAS

CFM: Pies cúbicos por minuto.

CVD: Chemical Vapor Deposition

DIO: Digital input/output

DRX: Difractómetro de rayos X.

FTO: Películas delgadas de óxido de estaño dopadas con flúor.

TCO: Óxidos conductores transparentes.

TIG: Tungsten Inert Gas

RESUMEN

En este proyecto se construye un sistema spray pirólisis controlado por un software desarrollado en el entorno de programación gráfico LabVIEW, para la obtención de películas delgadas de materiales conductores transparentes o TCO (*transparent conductive oxid*), los cuales son ampliamente utilizados principalmente en el desarrollo de celdas solares y pantallas inteligentes.

Dentro de los TCO particularmente se obtienen películas de dióxido de estaño dopado con flúor a partir del sistema desarrollado, realizando pruebas preliminares de obtención, ajustando variables de gran importancia como la temperatura, la velocidad de movimiento en la aspersion y el caudal; debido a que los requerimientos de este tipo de materiales son más rigurosos con el avance tecnológico, se dispone del control y monitoreo a partir de software, con el fin de que los materiales obtenidos sean funcionales y que cumplan características específicas como presentar alta conductividad, homogeneidad y alta transparencia.

Palabras clave: Control procesos, LabVIEW, películas delgadas, sensor, Spray pirólisis.

INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico en el mundo es la razón para el estudio y desarrollo de nuevos materiales con mejores propiedades y con amplias aplicaciones; además dicho estudio se ve envuelto en el desarrollo de investigaciones interdisciplinarias, que permitan tener establecidas las clasificaciones y a su vez todos los factores que influyen en la obtención de algún material. Dentro de la gran variedad de clasificaciones, existen materiales agrupados según su aplicación industrial, entre ellos se encuentran los TCO (transparent conductive oxid) los cuales son materiales conductores transparentes utilizados ampliamente en la industria como en celdas solares, pantallas inteligentes, circuitería, ventanas con tecnología de punta, telecomunicaciones, entre otras¹, estos a su vez hacen parte de las denominadas películas delgadas (thin films)².

Dentro de los TCO (transparent conductive oxid), uno de los materiales con más amplia aplicación son los FTO (Fluorine doped Tin Oxide o dióxido de estaño dopado con flúor) los cuales se encuentran en auge en el desarrollo de investigaciones según referencias de reconocidas bases de datos como ScienceDirect debido a que se constituye en el material base para la elaboración de celdas solares y de igual forma por el amplio campo de aplicaciones como anteriormente se mencionaron. Este tipo de materiales son obtenidos por métodos de deposición química que sirven para conformar las películas delgadas y a su vez los identifican con características específicas de espesores delgados y superficies homogéneas.

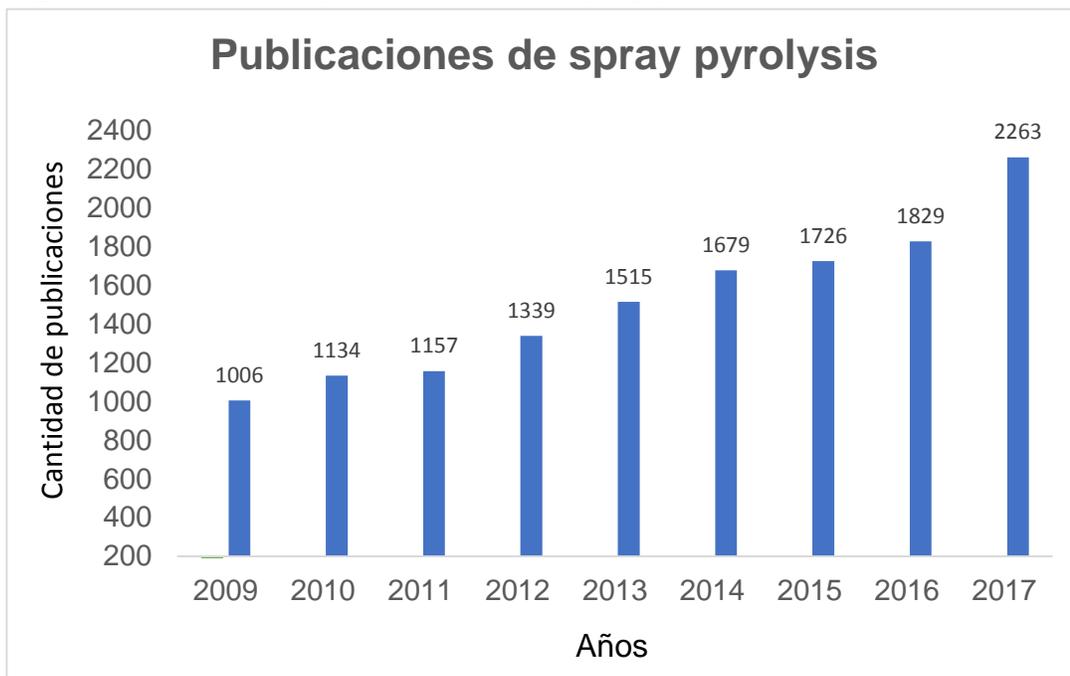
Por tal motivo, la obtención de materiales a nivel mundial es más riguroso cada vez, puesto a que se busca desarrollar materiales que superen las características de antecesores para una misma aplicación y permitan mejorar desde el proceso de obtención hasta ampliar el campo de aplicaciones donde pueden ser empleados; por ello los FTO como películas delgadas deben cumplir tres parámetros rigurosos para ser funcionales; deben ser homogéneos, conductores y transparentes³, sin el cumplimiento de alguno de los antes mencionados el material no es completamente funcional y por consiguiente debe ser desechado, lo que implica pérdidas en toda la cadena que involucre dicho material.

¹ M.T. Mohammada, A.A. Hashimb, M.H. Al-Maamory. Highly conductive and transparent ZnO thin films prepared by spray pyrolysis technique. Materials Chemistry and Physics, 2006. p. 382–387.

² CHOPRA KASTURI Thin Film Device Applications Indian Institute of Technology New Delhi, India

³ FILIPOVIC LADO, SELBERHERR SIEGFRIED, C. MUTINATI GIORGIO. Modeling and Analysis of Spray Pyrolysis Deposited SnO₂ Films for Gas Sensors. Transactions on Engineering Technologies. 2014. P. 295-310.

Figura 1. Cantidad de publicaciones de spray pirólisis.



Los materiales FTO son obtenidos por el método de spray pirólisis, el cual es uno de los métodos de deposición química más versátil, de bajo costo y fácil control para formación de materiales⁴, además la técnica cada vez es más ampliamente utilizada según datos de ScienceDirect⁵, donde cada año aumenta el número de artículos en el cual se referencia el método de spray pirólisis como se ve en la Figura 1. Involucra tecnología que permite por medio de modificaciones en los dispositivos y software tener un mayor campo de estudio. De esta forma se involucra la instrumentación y el desarrollo de software robusto que permiten mejorar las propiedades de los materiales obtenidos por esta técnica.

⁴ G. E. Patil, D. D. Kajale, V. B. Gaikwad, G. H. Jain. Spray. Pyrolysis Deposition of Nanostructured Tin Oxide Thin Films. International Scholarly Research Network ISRN Nanotechnology. 2012

⁵ SPRAY PYROLYSIS revisado en Noviembre 2017, disponible en <https://www.sciencedirect.com/>

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Construir un sistema de spray pirólisis controlado por LabVIEW.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar la máquina del sistema de spray pirólisis.
- Construir el sistema de calentamiento bajo los parámetros del spray pirólisis.
- Adecuar el sistema de flujo de los fluidos requeridos para el proceso.
- Desarrollar la programación de control en LabVIEW.
- Realizar pruebas preliminares de obtención de películas de dióxido de estaño dopado con flúor.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 PELÍCULAS DELGADAS

Se denomina una película delgada a un material sólido que acumula en forma de capa delgada sobre un soporte sólido, llamado sustrato, una especie atómica, molecular o iónica por condensación controlada, mediante un proceso físico, una reacción química y/o electroquímica; la especie atómica, molecular o iónica es denominada precursor, y puede encontrarse en fase vapor o en fase líquida⁶.

La forma en la que se encuentre el precursor permite seleccionar el método de deposición sobre el sustrato, bien sea por deposición de fase vapor o deposición de solución (fase líquida) con el fin de obtener las características distintivas de las películas delgadas, las cuales difieren de las películas gruesas empezando por su espesor en el orden de micrómetros y nanómetros⁷; además de la microestructura obtenida la cual se va formando por la adición progresiva de pequeñas capas según el proceso de nucleación y crecimiento. Adicionalmente las películas delgadas pueden presentar propiedades ópticas, magnéticas, conductivas o resistivas según sea la aplicación que se le desee dar.

Una de las más grandes clasificaciones de los materiales corresponde a la aplicación tecnológica que posean. En dicha clasificación los materiales conductores son algunos de los más estudiados hoy en día, sin embargo se hace énfasis en un tipo especial de materiales conductores formados por las películas delgadas.

1.1.1 Óxidos transparentes conductores. Dentro de la clasificación de los materiales según su aplicación tecnológica, los óxidos conductores transparentes o TCO (Transparent conducting oxides) son de gran importancia y tienen un auge en la industria debido al aumento en la demanda de materiales conductores de bajo costo, los cuales evidencian un crecimiento partiendo del número de citas en artículos e investigaciones científicas cada año⁸.

Son materiales transparentes conductores eléctricos con aplicaciones en celdas solares, ventanas inteligentes, espejos de calor, sensores de gas, telecomunicaciones, interfaces opto eléctricas y circuitería, entre otras⁹, los cuales

⁶ KASTURI LAL CHOPRA, INDERJEET KAUR. Thin Film Device Applications. Indian Institute of Technology New Delhi, India. 1983.

⁷ PAULEAU, Yves. Chemical Physics of Thin Film Deposition Processes for Micro- and Nano-Technologies. Dordrecht: Springer, 2001. ISBN 1402005253

⁸ STADLER ANDREAS. Transparent Conducting Oxides—An Up-To-Date Overview. University of Salzburg. Materials 2012

⁹ M.T. Mohammada, A.A. Hashimb, M.H. Al-Maamory. Highly conductive and transparent ZnO thin films prepared by spray pyrolysis technique. Materials Chemistry and Physics, 2006. p. 382–387.

son obtenidos a partir de las tecnologías para formación de películas delgadas conocidas en la industria como thin films¹⁰ entre las cuales están sputtering, Chemical Vapor Deposition(CVD)¹¹, deposición de laser pulsado (PLD)¹² y spray pirólisis¹³.

La obtención de películas delgadas debe ir en búsqueda de la aplicabilidad del material; por tanto para que la película obtenida sea útil, se deben cumplir sino todas, la mayoría de las siguientes características¹⁴:

- a) Las películas delgadas deben presentar homogeneidad superficial.
- b) La transparencia que presente la película, debido a que es la característica que le da el nombre a los materiales TCO.
- c) La conductividad de la película delgada.

1.1.2 El FTO. Existe una gran variedad de materiales conductores transparentes, dentro de los cuales, se encuentra el óxido de estaño dopado con flúor (SnO₂: F) conocido en la industria como FTO.

Es un semiconductor que presenta además de las características esenciales de los óxidos conductores transparentes anteriormente mencionadas, son materiales de bajo costo y tienen como ventaja que para la fabricación de este tipo de materiales, los elementos que se utilizan son abundantes en la naturaleza¹⁵; a su vez, es uno de los materiales más ampliamente utilizados a nivel industrial debido a sus excelentes propiedades¹⁶ en las diversas aplicaciones, debido a que este material tiene la combinación única de alta transparencia y baja resistividad. El valor de baja

¹⁰ SESHAN, KRISHNA Eds. Handbook of Thin Film Deposition - Techniques, Processes, and Technologies, 2012. ISBN: 9781437778748

¹¹ R Groenen, J Löffler, P.M Sommeling, J.L Linden, E.A.G Hamers, R.E.I Schropp and M.C.M van de Sanden. Surface textured ZnO films for thin film solar cell applications by expanding thermal plasma CVD. Thin Solid Films. 2001.

¹² S.K. Sinha, R. Bhattacharyab, S.K. Ray, I. Manna Influence of deposition temperature on structure and morphology of nanostructured SnO₂ films synthesized by pulsed laser deposition. Department of Metallurgical and Materials Engineering, Indian Institute of Technology. 2011.

¹³ G. E. Patil. Spray Pyrolysis Deposition of Nanostructured Tin Oxide Thin Films. ISRN NANOTECHNOLOGY. vol. 2012, p. 1-5

¹⁴LILIA MARTINEZ PEREZ. Fabricación y caracterización óptica, estructural y eléctrica de películas delgadas transparentes de óxido de Estaño, Circonio y Zinc. Mexico. 2005.

¹⁵ FLORES-CARRASCO G. &, ALCÁNTARA-INIESTA S. Propiedades estructurales, ópticas y eléctricas de películas de SnO₂ y SnO₂:F depositadas por rocío pirolítico ultrasónico. CIDS-ICUAP Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Superficies y Vacío 27(4) 126-132, diciembre de 2014.

¹⁶ K.G,DEEPA ANDJAMPANA,NAGARAJU. Development of an automated ultrasonic spray pyrolysis system and the growth of Cu₂ZnSnS₄ thin films. En: JOURNAL OF ANALYTICAL AND APPLIED PYROLYSIS. Jan.vol. 117, p. 141-146

resistividad del SnO₂: F es debido a una concentración de portador por vacantes de oxígeno y dopantes flúor sustitutivo¹⁷ lo que lo convierte en un mejor conductor.

1.2 MÉTODOS DE DEPOSICIÓN SOBRE PELÍCULAS DELGADAS

Los métodos de deposición sobre la superficie de películas delgadas se refieren a los procedimientos que están involucrados en la obtención de películas delgadas con el objetivo de lograr un recubrimiento homogéneo en la superficie del material, además de lograr un espesor en valores entre nanómetros hasta micrómetros. Existe una gran variedad de estos métodos los cuales difieren ampliamente en la fase en la que se realiza la deposición ya sea en fase gaseosa¹⁸ o en fase líquida; en el desarrollo de este proyecto se implementa el método de spray pirólisis.

1.2.1 Spray pirolisis. El spray pirólisis es un método de deposición química el cual consiste en la aspersion de una solución homogénea que está compuesta por un precursor, la cual es arrastrada por medio de un gas sobre un material o sustrato¹⁹ que se encuentra a una alta temperatura con el fin de formar la capa delgada²⁰ bajo ciertos parámetros que tiene el método de spray pirólisis.

El proceso de spray pirólisis posee además una serie de ventajas respecto a otros métodos de deposición química para formación de películas delgadas como se muestra en la Tabla1:

¹⁷A.A. Yadava, E.U. Masumdara, A.V. Moholkar. Electrical, structural and optical properties of SnO₂:F thin films: Effect of the substrate temperature. Journal of Alloys and Compounds.2009.

¹⁸ ANWAR,Sohail; EFSTATHIADIS,Harry andQAZI,Salahuddin. Handbook of Research on Solar Energy Systems and Technologies. 1st ed. US: IGI Global, 2013. ISBN 9781466619968

¹⁹ Dae Soo Jung, Seung Bin Park, Yun Chan Kang. Design of particles by spray pyrolysis and recent progress in its application. Korean J. Chem. Eng. 2010.

²⁰ CHOPRA, K. Thin Film Solar Cells. Op cit., p. 195 – 270.

Tabla1. Características de distintos métodos de deposición y su diferenciación.

Parámetros	Pulse Laser Deposition	Sputtering	Spray Pirólisis	Aqueous chemical growth
Temperatura	No requiere	No requiere	Temperaturas moderadas son requeridas para la descomposición.	Temperaturas leves (Bajo 100°C)
Vacio	Se requiere	Se requiere	No se requiere	No se requiere
Economía	Costoso	Costoso	Económico	Económico
Materias primas	Limitaciones en obtención de materias primas.	Limitaciones en obtención de materias primas.	No hay limitaciones en materias primas ni en materiales de manufactura.	No hay limitaciones en materias primas, materiales de manufactura y no requiere reactivos tóxicos.
Tiempo	Entre 5 y 6 horas	Entre 5 y 6 horas	Menor a 1 hora	Puede variar entre 1 a 40 horas
Impurezas en el deposito	Libre de impurezas	Libre de impurezas	Menor control sobre las impurezas	Libre de impurezas
Nanoestructuras	Sí	Sí	Sí, incluidos materiales porosos	Si, incluidos materiales porosos
Dopado	Limitaciones en dopado	Limitaciones en dopado	Muy fácil para dopar	Fácil de dopar.
Grandes aéreas	No es posible	Posible pero con limitaciones	Posible	Posible
Reproductibilidad	Muy buena	Muy buena	Buena	Buena
Opciones de Sustrato	Diversidad de sustratos.	Diversidad de sustratos.	Altas temperaturas de deposición influyen en la selección de sustrato.	Diversidad de sustratos.
Control de Crecimiento	Bueno	Bueno	Regular	Bueno

Fuente: SILVA, Leidy. UBAQUE, Lina. Determinación de las condiciones para la deposición de películas de SiO₂ sobre vidrio por la técnica de spray pirólisis utilizando silicato de sodio como precursor. Universidad América. 2010

El método de spray pirólisis, como se observa en la Tabla 1 presenta una serie de ventajas que favorecen su implementación y estudio; de las características que se

plantean, cabe destacar lo económico que es el método, la versatilidad, la facilidad que presenta el proceso para dopar y el tiempo de obtención de películas delgadas de diversas geometrías²¹, el cual al ser menor a una hora permite realizar más pruebas con el fin de mejorar las propiedades de la película que se desea obtener.

Existen unas etapas que constituyen el proceso general del método de deposición por spray pirólisis²² las cuales se describen a continuación:

- 1) Formación de gotas (droplets) las cuales están constituidas por la sal precursora disuelta en un solvente en fase líquida y son transportadas por un gas a una velocidad inicial²³.
- 2) El precursor es transportado hacia el sustrato y durante la trayectoria las gotas pasan a fase vapor debido a un proceso de evaporación del solvente y sublimación del precursor salino o bien por medio de un proceso de vaporización.
- 3) A partir del vapor generado las especies reaccionantes que se dirigen hacia el sustrato se difunden y se produce la reacción en fase heterogénea.
- 4) Formación de otros productos debido a la reacción química que sucede en fase vapor.
- 5) Formación de la capa fina por un proceso de nucleación y coalescencia con los cuales se obtienen los granos que cubren la superficie del material.

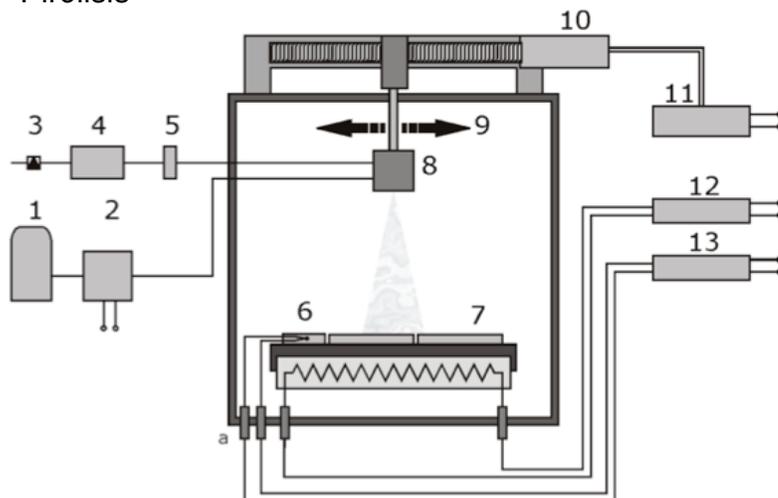
Para comprender el funcionamiento del spray pirólisis se muestra en la Figura 2 un esquema de las partes que constituyen a un sistema para realizar la deposición por el método mencionado.

²¹ FILIPOVIC LADO, SELBERHERR SIEGFRIED, C. MUTINATI GIORGIO. Modeling and Analysis of Spray Pyrolysis Deposited SnO₂ Films for Gas Sensors. Transactions on Engineering Technologies. 2014. P. 295-310.

²² N. REUGE, B. CAUSSAT. A dimensionless study of the evaporation and drying stages in spray pyrolysis. Computers and Chemical Engineering 31. 2007.

²³ PEREDNIS DAINIUS. Thin film deposition by spray pyrolysis and the application in solid oxide fuel cells. 2003.

Figura 2. Diagrama esquemático del proceso de Spray Pirólisis



QUIÑONES. CESAR. Síntesis de películas transparentes y conductoras utilizadas en celdas solares sensibilizadas por colorantes. 2012.

De la Figura 2 el elemento 1 corresponde al compresor, el cual permite distribuir aire para activar un sistema de movimiento neumático 9, 10 y suministra aire comprimido a la válvula 2 con la cual se permitirá el paso de aire para que el aspirador 8 atomice. Para el flujo del precursor se utiliza una bomba peristáltica 4, un manómetro 3 o dispositivo que permita monitorear la presión y una válvula de paso 5 para el control de flujo del precursor.

El control del sistema de movimiento 11 junto con el control de calentamiento 12 permite calentar la superficie 7 cuya temperatura se monitorea por medio de una termocupla 6. Adicionalmente se realiza una interfaz que permita visualizar, monitorear y controlar los distintos parámetros que se involucran en el sistema.

A partir de las etapas, elementos y las ventajas que presenta el método de spray pirólisis respecto a otros métodos, se describen los parámetros de funcionamiento del proceso más importantes para obtener películas delgadas con buenas características y alta aplicabilidad.

- Temperatura del sustrato: Es uno de los parámetros más importantes en el proceso de spray pirólisis debido a que la influencia de la temperatura afecta directamente las características que se obtienen en el material, ya que a muy altas temperaturas la reacción química del precursor se da antes de llegar a la superficie del sustrato y a muy bajas temperaturas llega en forma líquida lo que no favorece a la homogeneidad en la superficie²⁴.

²⁴ MARTINEZ PEREZ, LILIA. Fabricación y caracterización óptica, estructural y eléctrica de películas delgadas transparentes de óxidos de estaño, circonio y zinc. 2008.

- Concentración de la solución precursora: Al escoger los componentes de la solución, se debe tener en cuenta la solubilidad de éstos, con el fin de que el sistema sea totalmente homogéneo, esto permite que las capas que crecen sobre la superficie sean lo más uniforme posible, generando que la velocidad de crecimiento de la película sea adecuada, es decir, ni demasiado lenta ni demasiado rápida, por último es necesario conocer los fenómenos que ocurren al pasar una gota de esta solución sobre el sistema y la superficie de soporte²⁵.
- Velocidad y presión en la formación de gotas (droplets): La velocidad en el flujo del precursor junto con los parámetros anteriormente mencionados influyen en el momento en que se forman los óxidos y sucede la reacción del precursor; sin embargo la presión aplicada en el aspersor, ya sea al precursor o al aire de arrastre presenta cambios significativos. Si la presión de aire se incrementa, decrece la generación del diámetro de la gota y de forma inversa, si se aumenta la presión en el precursor causa un incremento directo en el diámetro de la gota formada que será transportada a la superficie del sustrato²⁶.

Además de los parámetros mencionados, existen otros que dependen del tipo de sustrato y el precursor que se empleen además de las características que se desean obtener en la película delgada, de esta manera experimentalmente se cambian parámetros de flujo de aire, flujo del precursor, altura o distancia que existe entre el atomizador y el sustrato, ciclos de aspersion sobre la superficie del sustrato²⁷; los cuales permitirán obtener gran variedad de películas delgadas de distintas características.

1.3 LAZOS DE CONTROL

La teoría de control en la ingeniería se fundamenta en la dinámica de variables que se presentan en el entorno ingenieril. Por tanto, se sabe que los procesos presentan cierto número de variables dependientes las cuales deben ser controladas con el fin de obtener un comportamiento deseado del sistema. Por tal motivo para plantear un control se requiere conocer todos los parámetros que se encuentran ligados al sistema; estos son las entradas, las salidas, perturbaciones, repeticiones, etc.

²⁵ CESAR AUGUSTO RODRIGUEZ SEGURA. Diseño conceptual y construcción de un reactor de spray pirolisis para la síntesis de películas delgadas con aplicaciones fotoactivas. Fundación Universidad América. 2015.

²⁶ LADO FILIPOVIC, MEMBER, IAENG, SIEGFRIED SELBERHERR, GIORGIO C. MUTINATI, ELISE BRUNET, STEPHAN STEINHAUER Modeling Spray Pyrolysis Deposition. Proceedings of the World Congress on Engineering 2013 Vol II.

²⁷ C O. AYIEKO, R J. MUSEMBI, S M. WAITA, B O. ADUDA AND P K. JAIN. Structural and Optical Characterization of Nitrogen-doped TiO₂ Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis on Fluorine Doped Tin Oxide (FTO) Coated Glass Slides. International Journal of Energy and Engineering. 2012.

El problema principal del diseño del control de un sistema es determinar las características y parámetros del controlador, para esto las salidas controladas pueden:

1. Establecerse en valores determinados denominados referencias.
2. Mantenerse en los valores de referencia a pesar de las perturbaciones desconocidos²⁸.

Existen dos grandes grupos para implementar un lazo de control, estos son en lazo cerrado y en lazo abierto. Para poder relacionar las variables de entrada y de salida de un sistema se requiere implementar un sistema que retroalimente dichas variables, con el fin de corregir el error en la entrada partiendo de un factor correctivo generado en la salida.

En un sistema de control en lazo cerrado, lo que se busca es alimentar al controlador con la señal de error operada, la cual corresponde a la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación; sin embargo dicha señal de realimentación en una primera iteración corresponde a la señal de salida con el error sin factor de corrección. Esta diferencia se realiza con el fin de reducir el error a medida que pasa el tiempo y llevar la salida del sistema a un valor deseado. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema²⁹, la cual presenta una ventaja con respecto al sistema en lazo abierto debido a que las perturbaciones externas no afectan en gran medida al sistema sin importar si los dispositivos o sensores implementados sean poco precisos.

1.3.1 Control PID. Existe gran variedad de configuraciones para realizar un controlador, sin embargo el controlador PID es el algoritmo de control que más es implementado en la industria ya que proporciona una gran flexibilidad, además de la robustez y la relación que existe entre sus parámetros³⁰. Los parámetros empleados y con los cuales este controlador recibe su nombre son la acción proporcional, acción derivativa y acción integradora.

La acción proporcional es la encargada de corregir los picos y las oscilaciones, la acción integral corrige el error en estado estable, es decir que busca una aproximación al set point aproximando la señal de error a cero y la acción derivativa se encarga de corregir los cambios rápidos ocurridos en el sistema. De manera general la ecuación que corresponde a un controlador PID es la siguiente:

²⁸ SILVA, GUILLERMO J.; DATTA, ANIRUDDHA ANDBHATTACHARYYA, SHANKAR P. PID Controllers for Time-Delay Systems. Boston, MA: Birkhauser, 2005. ISBN 9780817642662

²⁹ OGATA, Katsuhiko. Ingeniería De Control Moderna. Pearson Educación de México, S.A. de C.V, 2011. ISBN 9788483226605. pag 7-8

³⁰ SANCHEZ JOAN; SANCHIS MIGUEL; SANZ ESTEBAN. Introducción y aplicación en LabVIEW para el control de un proceso continuo mediante PID. Universidad politécnica de Cataluña, 1999.

Ecuación 1. Ecuación general de un controlador PID

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Sin embargo la función puede ser expresada como:

Ecuación 2. Ecuación simplificada de un controlador PID

$$PID_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + sK_d$$

Siendo K_p la constante proporcional, K_i la constante integradora y K_d la constante derivativa aplicada a un sistema. El método de ajuste de ganancia consiste en el ensayo de un sistema con escalón unitario y se calculan algunos parámetros como la máxima pendiente de la curva y el retardo, de esta forma se puede establecer las constantes anteriormente mencionadas. Este método para controladores PID fu propuesto por Ziegler y Nichols en 1942, quienes se basaron en la experimentación y prueba y error para desarrollarlos³¹.

1.4 ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos se refiere a un seguimiento de cambios en señales análogas a digital o digital a análogo a partir de sensores; las señales son adquiridas en un dispositivo para ser llevadas a otro dispositivo de almacenamiento o un computador. El dispositivo de National Instruments diseñado con ese fin tiene como nombre MyDAQ (Figura 3) y permite el arreglo de señales generadas desde el ordenador PC o adquiridas desde un sensor³² para realizar alguna operación o simplemente para almacenar datos. La adquisición de datos tiene lugar en un software desarrollado a partir del entorno de programación gráfico LabVIEW.

³¹ VIRGINIA MAZZONE. Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes. Marzo 2002. Pag 3.

³² ZURIDA, A. Z., FAIRUZ, S. S., & RISBY, M. S. Conceptual Design of Wireless DAQ System for Vehicle Blast Testing. Procedia Computer Science, 2016, 94, 502-509.

Figura 3. Dispositivo myDAQ para adquisición de datos



MyDAQ Dispositivo de adquisición de datos para estudiantes. National Instruments. Disponible en <http://www.ni.com/es-co/shop/select/mydaq-student-data-acquisition-device>

1.4.1 Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW).

LabVIEW, de la empresa National Instruments, es un entorno de programación y lenguaje gráfico o lenguaje G, creado con el fin de cambiar el esquema de programación en texto a programación con funciones en iconos para desarrollar aplicaciones.

Dicho cambio se realiza con el fin de entregar confiabilidad, sencillez al utilizar LabVIEW, es decir que es más intuitivo; además presenta una ventaja en cuanto a la plataforma en que se puede desarrollar aplicaciones, permitiendo trabajar en distintos sistemas operativos y a su vez permite la integración de otros lenguajes de programación en los cuales se haya desarrollado previamente alguna aplicación.

Dos partes de LabVIEW y muy importantes son el *diagrama de bloques* donde va el desarrollo de programación y el *panel frontal* que es la interface maquina hombre³³. A lo largo de la historia el desarrollo de aplicaciones en LabVIEW, las cuales van desde proyectos académicos hasta desarrollo de software con fines industriales se ha demostrado la aplicabilidad que tiene y la solidez del software que es desarrollado bajo este entorno de programación permitiendo monitorear, controlar, automatizar diversos procesos, facilitando la creación de proyectos.

³³ VIZCAÍNO, J. R. L., & SEBASTIÁ, J. P. LabView: entorno gráfico de programación. Marcombo. 2011.

1.5 RESISTENCIAS DE CALENTAMIENTO

Los sistemas de calentamiento en la industria y en los laboratorios están conformados generalmente de resistencias eléctricas, las cuales se encuentran dispuestas de una forma específica con el fin de generar una transferencia de calor bien sea por conducción, convección, radiación o una combinación de ellas. Existen dos grandes grupos de resistencias clasificadas como resistencias eléctricas metálicas (haciendo referencia al material al cual le es suministrada la energía eléctrica y genera el calor), estas son las resistencias de Ni-Cr y las resistencias de aleaciones Fe-Cr-Al. La mayoría de aplicaciones para tratamientos térmicos y hornos convencionales implementan resistencias de Ni-Cr, sin embargo estas requieren ser dispuestas en encerramientos o bloques (generalmente de ladrillo refractario) para focalizar la transferencia de calor. Por otro lado las resistencias de aleaciones Fe-Cr-Al son menos implementadas pero poseen una serie de ventajas con respecto a las de Ni-Cr:

- La densidad es inferior.
- La temperatura de fusión es más elevada.
- La temperatura máxima de utilización es más alta.
- El calor específico y la conductividad térmica son similares pero más alta.
- La resistencia a la rotura en caliente es más baja.³⁴

Adicionalmente, las resistencias de aleaciones Fe-Cr-Al se encuentran en el mercado instaladas en una estructura cerámica, lo cual las hace aún más resistentes a las altas temperaturas, facilitan la transferencia de calor y el tiempo de permanencia en alta temperatura es mayor, además, la estructura cerámica protege el alambre, lo cual permite que puedan ser utilizadas en medios donde hay presente ambientes químicamente densos sin producir oxidación o modificar las propiedades del material base de la resistencia.

1.6 SOLDADURA TIG

Dentro de los tipos de procesos de soldadura, se encuentra la soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) la cual debe su nombre a que el arco eléctrico se genera entre un electrodo de Tungsteno y el metal base, bajo una atmósfera producida por un gas inerte, el cual normalmente es argón.

El procedimiento de soldadura TIG genera cordones de gran calidad, sin escorias (dado que emplean electrodos no consumibles sin revestimiento), ni proyecciones; además el procedimiento TIG se suele emplear para soldar piezas de poco espesor (como en láminas). De esta manera, para espesores mayores a los 6 mm, se suele

³⁴ HORNOS DE RESISTENCIA. Obtenido de:
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.Hornos.RESISTENCIAS.2006.pdf>

emplear procedimientos de soldadura por arco sumergido³⁵. Entre las ventajas que presenta la soldadura TIG están las siguientes:

- No genera escorias en el cordón, reduciendo de esta manera la limpieza, sin embargo dependiendo del tipo de material sobre el cual se está aplicando la soldadura, se generan reacciones que en mayor o menor medida producen escoria.
- El proceso de soldadura TIG es versátil en cuanto al modo de aplicación, permitiendo ser aplicado en cualquier posición y facilitando uniones en casos específicos de tuberías o láminas.
- De la misma manera que no se generan escorias, la aparición de salpicaduras sobre los materiales soldados se reduce en gran medida.

El proceso de soldado de un acero inoxidable es más rápido con respecto al de un acero al carbono común debido a que el punto de fusión del acero inoxidable AISI 304 se encuentra en los 1400 – 1450°C, por tal motivo se requiere menos calor para producir la fusión.

Cuando un acero inoxidable 304 es sometido a un intervalo de temperatura entre 600 y 900 °C durante un período de tiempo se da lugar a un precipitado de compuestos de carburo de hierro y cromo, el cual empobrece el contenido de cromo en el acero que corresponde al 17%³⁶, y cumple la función protectora que le confiere su característica de inoxidable, sin el cual el acero queda expuesto a la corrosión.

Por tal motivo para reducir la producción de precipitados por el proceso de soldadura se recomienda utilizar electrodos que contengan en su composición elementos como el Titanio (Ti) o el Niobio (Nb), los cuales se combinan primeramente con el carbono con el fin de evitar que se creen compuestos con el cromo que generen precipitados.

³⁵ SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES [en línea]
<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn48.html>

³⁶ RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES [en línea]
<http://www.inoxidable.com/corrosion.htm>

2. DISEÑO CONCEPTUAL Y PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

A continuación se establecen las alternativas para el diseño del sistema spray pirólisis y sus respectivos subsistemas, partiendo de parámetros de funcionamiento³⁷³⁸³⁹ como se muestran en el Cuadro 1, con el fin de garantizar el cumplimiento de los criterios para obtención de películas de dióxido de estaño dopadas con flúor.

Cuadro 1. Parámetros de funcionamiento del spray pirólisis.

Rango temperaturas generales	15 – 600°C
Rango de temperatura de obtención de películas	250-550 °C
Altura aspersor (desde el sustrato)	5–20 cm
Velocidad de movimiento de aspersor	100 - 800 mm/s
Área síntesis películas	9 cm x 7,5 cm
Volumen de precursor	10-500 mL
Rango de caudal de aire del aspersor	1 – 6 CFM
Tiempo de operación	1-10 in

2.1 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

2.1.1 Estructura. Para realizar el diseño de la estructura se tuvieron en cuenta los parámetros de trabajo del sistema spray pirólisis anteriormente mencionados. Con el fin de lograr una estructura robusta y a su vez altamente resistente a cambios bruscos de temperatura y exposición a químicos y medios oxidantes, se plantea el desarrollo del sistema a partir de los siguientes materiales:

- Acero al carbono-manganeso-silicio
- Acero con cromo (bajo contenido de cromo)
- Acero inoxidable, AISI 304
- Acero inoxidable, AISI 316
- Aluminio aleación 2024-T6

Para la selección del material se analizan los coeficientes de conductividad térmica y la resistencia térmica en temperaturas de trabajo bien sea en servicio continuo o

³⁷ G. KOROTCENKOV, V.BRINZARI. Peculiarities of SnO₂ thin film deposition by spray pyrolysis for gas sensor application. University of Michigan. Sensors and Actuators. 2001.

³⁸ D.S. ALBIN AND S.H. RISBUD, Advanced Ceramic Materials,2(3A), 243 (1987).

³⁹ TINA SEBASTIAN. Automation of Chemical Spray Pyrolysis Unit and Fabrication of Sprayed CuInS₂/In₂S₃ Solar Cell. Cochin University of Science and Technology. India. Thin Film Photovoltaic Division. 2009.

como máxima temperatura de operación; dentro de los cuales se busca un menor coeficiente de conductividad térmica con el fin de disminuir la transferencia de calor por las superficies de las paredes desde el interior del sistema donde existe una generación de calor hacia el exterior en donde se encuentran dispositivos eléctricos, cables y mangueras; por ello se seleccionan los siguientes materiales a partir de las tablas del Anexo A:

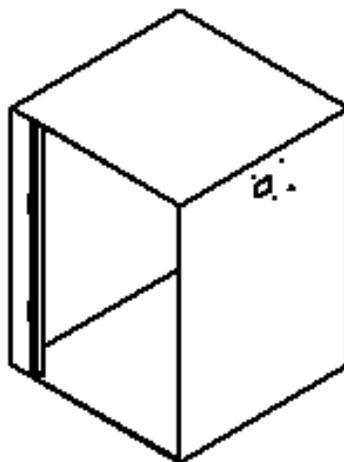
- Acero inoxidable, AISI 304, coeficiente de conductividad $k= 14.9 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$
- Acero inoxidable, AISI 316, coeficiente de conductividad $k= 13.4 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$
- Acero con cromo (bajo contenido de cromo), coeficiente de conductividad $k= 37.7 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$

Los materiales seleccionados presentan coeficientes de conductividad con valores muy cercanos, otro factor que influye en la selección son los costos para la obtención, la facilidad de maquinado (en la cual se tiene en cuenta la dureza de los materiales siendo la de los aceros inoxidables de 80 Rockwell B y la del acero con cromo 69 Rockwell B) y la fácil obtención de los mismos. Por tal motivo se procede a seleccionar el Acero inoxidable AISI 304.

Se plantea implementar lámina de Acero inoxidable AISI 304 calibre 20 o calibre 18, los cuales tienen espesores de 0.9 y 1.2 mm respectivamente. Con el fin de incrementar la rigidez de la estructura y el ahorro de material se plantea el diseño de la estructura a partir de una sola pieza como se ve en la Figura 4, implementando dobleces para realizar las secciones de la estructura evitando que los mismos dobleces creen interferencias entre las caras. Sin embargo las uniones entre las caras laterales y la inferior deben ser reforzadas utilizando soldadura TIG.

Para las uniones entre la estructura y los distintos elementos y dispositivos que conforman los subsistemas del sistema spray pirólisis se utilizan tornillos y tuercas de rosca normal de distintas longitudes y diámetro de 3.175 mm, comercialmente tornillos de 1/8 in. Sin embargo las uniones entre los ejes verticales que conforman la base del aspersor y los acoples se plantea implementar tornillos Bristol sin cabeza.

Figura 4. Diseño conceptual de la estructura.



2.1.2 Dispositivo de calentamiento. La resistencia de calentamiento seleccionada a partir de los parámetros necesarios para el sistema es una resistencia cerámica infrarroja, la cual pertenece al grupo de resistencias de aleación Fe-Cr-Al, con temperaturas de operación en continuo hasta de 771°C ⁴⁰. La ventaja de esta resistencia es que permite mantener la temperatura por periodos de tiempo mayores y su diseño garantiza una respuesta de calentamiento más rápida. Las resistencias cerámicas infrarrojas están especialmente diseñadas para ser implementadas con termocuplas (principalmente tipo k) en sistemas controlados. La información de temperaturas de trabajo y el coeficiente de radiación se encuentran en el Anexo B, con los cuales se selecciona una resistencia de 500W.

2.1.3 Aislamiento. La generación de calor va ligada a los materiales que se emplean en el sistema, uno de los factores esenciales en aplicaciones de transferencia de calor son los aislamientos, cuyo fin es el de reducir la transferencia de calor del medio con mayor temperatura hacia el medio de menor temperatura.

En la industria, los aislamientos más conocidos son ladrillo refractario, fibra de vidrio, tela de vidrio o similares; sin embargo para aplicaciones en altos hornos y muflas, en las cuales se eleva la temperatura del proceso hasta a 1200°C , se implementan materiales cerámicos. En el Cuadro 2 se plantean las diferencias entre los distintos aislamientos más implementados.

⁴⁰ GERIQUE, T., et al. Aleaciones de Al-Cr-Zr para aplicaciones a altas temperaturas. En: REVISTA DE METALURGIA. Aug 30, vol. 34, no. 4, p. 358-373

Cuadro 2. Características de aislamientos térmicos.

MATERIAL	COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD (W/mK)	DENSIDAD (Kg/m ³)	MÁXIMA TEMPERATURA (°C)	PUNTO DE FUSIÓN (°C)
Manta cerámica	0.06-0.32	64-192	1300	1760
Ladrillo refractario	0.47-1.05	1800	1650	1800
Fibra de vidrio	0.07	80	520	1200

Fuente: GOODFELLOW. 2018. [Consultado el 01/21/10:50:252018]. Disponible en <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-304.html>

Como se ve en el Cuadro 2, la manta cerámica presenta un menor coeficiente de conductividad y una alta resistencia a altas temperaturas que permiten que sea funcional en el desarrollo de este proyecto, adicionalmente la manta cerámica es flexible y permite ser adaptada en los espacios según la necesidad sin requerir cortes especiales para ser adecuada. Por tal motivo se plantea la implementación de manta cerámica, la cual es producida a partir de sílice y alúmina de alto grado de pureza, cuyo coeficiente de conductividad térmica se encuentra entre los rangos de 0.06 – 0.32W/mK, el cual es bastante bajo con respecto al del ladrillo refractario o la tela de vidrio, cuyos coeficientes de conducción están cercanos a 1.5 W/mK.

Particularmente la manta cerámica es aplicada para revestir hornos, intercambiadores de calor y especialmente para hornos de laboratorio puesto a que posee una alta resistencia a los ataques químicos directos de la mayoría de ácidos, exceptuando el ácido fosfórico y ciertos álcalis fuertes; además, las propiedades de la manta cerámica no se ven afectas al momento de contacto con agua o aceites. Las demás propiedades se pueden visualizar en el Anexo C.

2.1.4 Termocupla. Para las mediciones de la variable de temperatura en un sistema son utilizados sensores como las termocuplas, RTDs, termómetros, etc. Las termocuplas son el sensor de temperatura más común utilizado en la industria, está hecha de dos alambres de distinto material unidos en un extremo los cuales al acercarlos a un elemento con cierta temperatura, dicho valor de temperatura es adquirida por el sensor en la unión de los metales y se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck⁴¹) del orden de los milivolts el cual aumenta proporcionalmente con la temperatura⁴².

Las dos termocuplas más comunes son la tipo J y la tipo K. Para el caso específico del sistema spray pirólisis, se plantea implementar una termocupla tipo K cuyo rango

⁴¹ R.Heikes y R.Ure, Science and Engineering of Thermoelectricity (Clarendon Press Co.,1961) - Capítulos 1,2 y 10

⁴² Nota Técnica 2. Termocuplas, rev. b, <http://www.arian.cl>

de temperatura se encuentra entre los -270 y 1370°C , con una salida de voltaje hasta de 54.875 mV; con respecto a la termocupla tipo J, la tipo K presenta un rango más amplio de temperaturas permitiendo así su aplicación en el sistema de control PID de la resistencia infrarroja para altas temperaturas.

2.1.5 Movimiento. Se requiere un control de los sistemas que intervienen en el proceso de obtención; dentro de los subsistemas planteados, no se consideraba el sistema de movimiento, sin embargo a partir de una extensa revisión bibliográfica y de pruebas experimentales hechas en proyectos previos, se evidencia una mejoría en la homogeneidad superficial de las películas implementado un sistema de movimiento del aspersor. Por tanto se plantean dos opciones para realizar el movimiento, estos son:

- Movimiento por pistón neumático
- Movimiento por transmisión de motor correa-polea.

Los parámetros que se tienen en cuenta para la selección del sistema de movimiento son la velocidad con la cual es posible mover el boque del aspersor, los costos de suministro y puesta en funcionamiento de los dispositivos involucrados, el consumo eléctrico y tamaño de los equipos. En el Anexo D se muestran las ventajas y desventajas de los sistemas planteados, junto con la opción de no implementar movimiento.

Se evidencia que el no realizar el movimiento aumenta el grado de precisión que deben tener los demás sistemas, por tanto se requieren dispositivos de aspersión, bombeo y control del proceso mucho más precisos y a su vez más costosos; además existe un riesgo de goteo del precursor sobre la película una vez ha terminado el proceso lo cual puede generar fracturas en la película o cambios al tener que secar la película obtenida previamente.

Se selecciona implementar el sistema de movimiento con motor y transmisión de potencia por polea-correa debido a la ventaja que se tiene en el control de la velocidad, la fácil adquisición de los componentes y el bajo costo de los mismos con respecto al sistema neumático; teniendo en cuenta el mantenimiento de los dispositivos en el sistema de movimiento a partir de motor, es de más bajo costo, a pesar de que se deben hacer mantenimientos correctivos de cambio de correa periódicamente, debido a la exposición de la correa de caucho a temperaturas cercanas a los 60°C por convección en cortos periodos de tiempo.

El motor que se plantea para realizar el movimiento es un motor de pasos, los cuales en aplicaciones de sistemas de movimiento presentan ventajas con respecto a los motores DC convencionales, servomotores y motor reductores debido al torque generado y velocidades de trabajo máximas.

2.1.6 Sistema de flujo de fluidos. En el sistema de spray pirólisis se requiere una relación entre los flujos de aire y del precursor, los cuales son atomizados por medio del aspersor. El dispositivo para realizar la aspersión es un aerógrafo de acción doble (Anexo E). A partir del accionamiento del gatillo del aerógrafo es posible regular la salida de aire y de fluido líquido.

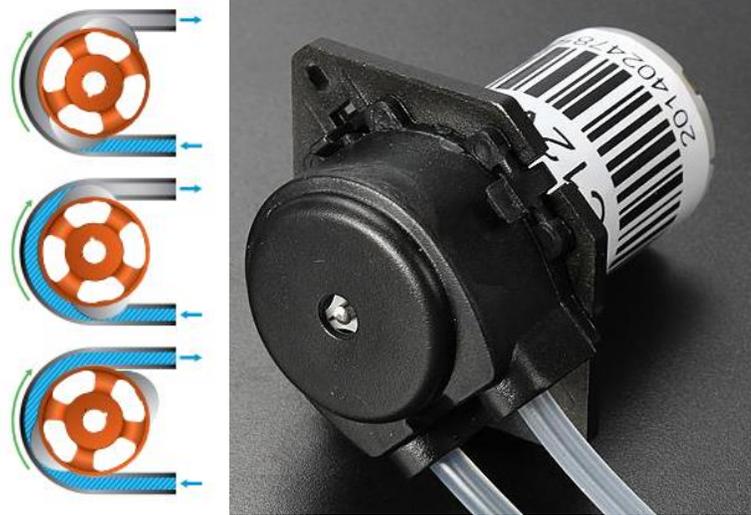
Figura 5. Compresor de único pistón



El aerógrafo debe ser alimentado con aire, el cual viene de un compresor; para el caso específico se selecciona un compresor de pistón único el cual se muestra en la Figura 5, en los cuales el aire es aspirado al interior de un cilindro, por la acción de un pistón accionado por una biela y un cigüeñal, a su vez tienen como ventaja que son diseñados en diversos tamaños permitiendo así un amplio rango de selección, desde compresores de potencia de 1/5 hasta de 60 Hp, además es posible adaptar componentes que mejoren la calidad del aire suministrado y a su vez regular el aire comprimido, como lo es en el caso de los reguladores, presostatos y filtros de aire, junto con tanques de almacenamiento.

El flujo del precursor hacia el aspersor, en combinación con el caudal de aire que viene del compresor, debe formar las gotas con el contenido adecuado, que permitan realizar la aspersión sobre el sustrato o película de vidrio, con el fin de lograr la reacción química deseada. En busca de un sistema continuo de alimentación del fluido hacia el aspersor, se plantea la implementación de bombeo, de esta forma se garantiza dejar constante la variable de caudal del sustrato desde que comienza el ciclo de operación hasta el final. La bomba seleccionada es una bomba peristáltica, la cual es un tipo de bomba de desplazamiento positivo especialmente diseñada para bombear fluidos químicos debido a que el medio que debe ser bombeado no entra en contacto con los dispositivos de la bomba.

Figura 6. Principio de trabajo de la bomba peristáltica e imagen de la bomba.



ELECTRONICLAB. Bomba peristáltica. 2018. Disponible en <https://electronilab.co/tienda/bomba-de-dosificacion-peristaltica-12-vdc/>.

Como se ve en la Figura 6 el fluido entra por el tubo o manga, después de esto, una zapata rotatoria comprime el fluido sellándolo en el interior hacia la salida de descarga, de tal forma que no hay contacto directo con el fluido⁴³. Por otro lado, cuando se requieren equipos de bombeo que exigen grados de precisión altos en la dosificación, este tipo de bombas son las indicadas, además de su fácil mantenimiento y control.

⁴³ BOMBA PERISTALTICA [en línea] <https://www.verderflex.com/es/como-funcionan-las-bombas-peristalticas-de-dosificacion/>

3. DISEÑO DETALLADO DEL SISTEMA SPRAY PIRÓLISIS

3.1 CÁLCULO DEL COMPRESOR

La selección del compresor se da partir del dispositivo de aspersión seleccionado al cual se le conoce que tiene un consumo entre 20 y 30 psi, por tanto se procede a seleccionar el compresor de la siguiente manera.

Conociendo la máxima presión de operación del aspersor, se realiza el cálculo de la relación de compresión, adicionalmente se conoce que el caudal de aire que pasa por el aspersor es de 2CFM.

Inicialmente el valor de 30 psi se pasa a unidades de bar y el caudal de aire de 2CFM se pasa a unidades del sistema internacional y se procede a implementar las ecuaciones para el cálculo de aire comprimido⁴⁴.

$$P_{fun} = 30 \text{ psi} = 2.06843 \text{ bar}$$

$$Q = 2 \text{ cfm} = 3,398 \text{ m}^3/\text{h} = 0.0566 \text{ m}^3/\text{min}$$

Con el valor de la presión inicial de funcionamiento se calcula la relación de compresión partiendo de una presión atmosférica en la ciudad de Bogotá D.C. que corresponde a 0.7466 bar.

Ecuación 3. Relación de compresión.

$$RC = \frac{P + Patm(Bog)}{Patm(Bog)} = \frac{(2.06843 \text{ bar}) + 0.7466 \text{ bar}}{0.7466 \text{ bar}} = 3.7704$$

Conociendo la relación de compresión y el caudal de aire (m³/min) se determina la potencia del compresor

Ecuación 4. Caudal del compresor.

$$Q = \frac{P}{8.01(RC^{0.286} - 1)}$$

Despejando P queda

$$P = Q * 8.01(RC^{0.286} - 1)$$

Reemplazando los valores

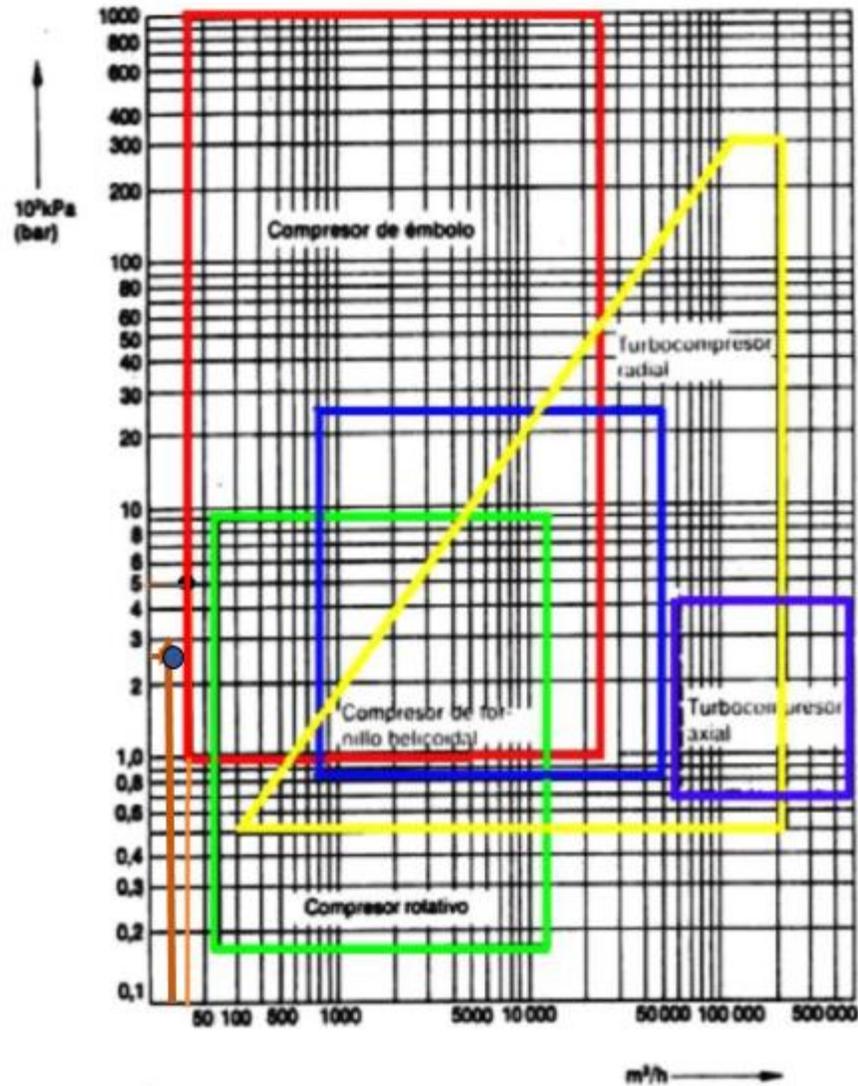
$$P = (0.0566) * 8.01((3.7704)^{0.286} - 1)$$

⁴⁴ ENRIQUE CARNICER ROYO. Aire comprimido, 1977. p 247- 253.

$$P = 0.2093HP$$

Con el valor de potencia, los valores de relación de compresión y caudal se selecciona el tipo de compresor, cruzando el valor de 3.398 m³/h con una presión de 2.06843 bar como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Nomograma para determinar tipo de compresor



MORALES, Miguel. Nomogramas de neumática. 2018.

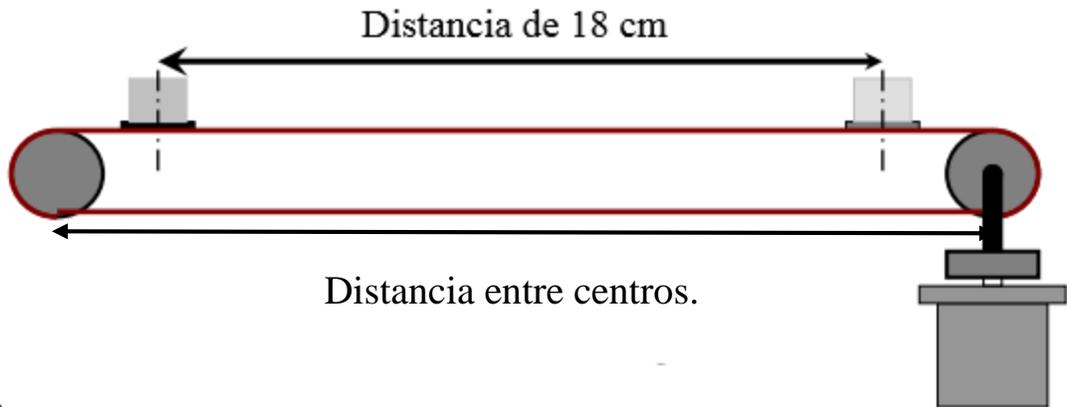
Debido al bajo caudal de aire que se emplea nominalmente en un aerógrafo (aproximadamente de 2cfm), al realizar el cruce, el punto se encuentra por fuera de las gráficas, sin embargo manteniendo la presión y para un caudal de aire mayor, en caso de que haya un mayor consumo, el tipo de compresor que se requiere es un compresor de émbolo de capacidad 0.2093 HP es decir de 1/5 HP.

Adicionalmente, debido a los cortos periodos de funcionamiento del compresor no se requiere la instalación de un acumulador que alimente al aspersor.

3.2 SELECCIÓN DE POLEA-CORREA

La selección de la transmisión de potencia por correa y p Polea se da a partir de los requerimientos del sistema; dichos requerimientos involucran variables como el peso del bloque que debe ser movido el cual está comprendido entre 0.5 y 1 Kg, las temperaturas de operación (no constantes) siendo estas de máximo 60°C por convección, el diámetro del eje del motor que transmite la potencia y la distancia que existe entre la p Polea conductora y la p Polea conducida. El diámetro del eje del motor paso a paso, generalmente es de 5mm. Por tal motivo se procede a seleccionar una p Polea que se acople a dichos requerimientos bajo el montaje que se visualiza en la Figura 8.

Figura 8. Montaje de motor, p Polea y correa.



Teniendo en cuenta el anterior esquema donde la distancia de 18cm corresponde a la distancia en la que el bloque del aspersor puede desplazarse; siendo la distancia entre centros de 25 cm se plantea la transmisión de p Polea correa con una relación de 1, debido a la dimensión del eje en el cual se acopla la p Polea impulsora.

Se selecciona una p Polea de diámetro 10mm dado que nominalmente y comercialmente es la medida más pequeña para implementar correas dentadas, con lo cual la correa deberá ser tipo XL con paso de 1/5" como se ve en el Anexo F La longitud de la correa se determina de la siguiente forma⁴⁵:

⁴⁵ CORREAS DE TRANSMISIÓN CÁLCULO Y Diseño [en línea]
<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn121.html>

Ecuación 5. Longitud de la correa.

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

Donde

Lc es la longitud de la correa

E es la distancia entre centros de los ejes

D es el diámetro de la polea mayor

d es el diámetro de la polea menor

$$Lc = 2(25cm) + \frac{\pi}{2}(1 + 1)cm + \frac{(1 - 1)^2}{4(25cm)}$$

Por tanto Lc (longitud de la correa) es de 53.1416 cm.

Teniendo en cuenta la velocidad de la correa dada por la ecuación:

Ecuación 6. Velocidad de la correa

$$Vc = \frac{\pi * d * N}{60}$$

Donde

N es el número de revoluciones

D es el diámetro de la polea menor

Utilizando un valor máximo de velocidad de 0.8 m/s y el diámetro de la polea, se halla el valor máximo de revoluciones que el motor debe suministrar para una máxima velocidad lineal al momento de realizar la aspersión.

$$N = \frac{Vc * 60}{\pi * d}$$

$$N = \frac{(800 \frac{mm}{s}) * 60}{\pi * (10 mm)} = 1528 rpm$$

La velocidad lineal de 0.8m/s corresponde a la velocidad lineal con la que se desplazará el bloque del aspersor, por tanto las revoluciones requeridas son de 1528 rpm. Debido a que las velocidades de trabajo son bajas, se debe tener en cuenta la tensión de la correa para evitar vibraciones, para ello se implementa un

tensor de igual diámetro que el de las poleas ubicado en la parte superior de la polea conducida con el cual sea posible mantener en un periodo más prolongado la correa con la tensión necesaria sin presentar vibraciones significativas.

3.3 SELECCIÓN DEL MOTOR

Los motores paso a paso son conocidos en la industria en variedad de aplicaciones, especialmente en los montajes de las impresoras 3D para realizar movimientos en sus ejes X, Y y Z. Por tanto los cálculos y parámetros de selección del motor se dan a partir de la anterior aplicación, debido a que el bloque del aspersor que se desea mover, se desplaza por el eje X como si fuera una impresora. Los datos que se tienen en cuenta para los cálculos se mencionan a continuación:

Carga lineal: Esta carga corresponde a la fuerza que se ejerce debido a la masa del bloque del aspersor sobre las líneas guía y la correa.

$$F = W = m * g = 1 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 9.81 \text{ N} \approx 10 \text{ N}$$

Donde la m corresponde a la masa del bloque del aspersor que corresponde a la suma total de las masas del aspersor, la estructura del bloque del aspersor, los rodamientos lineales que permiten el movimiento y una masa adicional, en el caso de que a futuro se desee implementar un motor, de esta forma la masa total corresponde a 1Kg y la carga total aplicada es de 10N.

Los cálculos teóricos de la selección de motores paso a paso se relacionan a continuación utilizando los datos de diámetros y velocidad (rpm) hallados previamente en la selección de la correa-polea.

Teniendo en cuenta que generalmente los motores paso a paso que se implementan presentan una inercia de 68 g*cm², inicialmente se calcula la inercia total de la siguiente manera⁴⁶:

Ecuación 7. Inercia total

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

Donde

J_{reduc} es la inercia de reductores

J_w es la inercia de la carga

J_{poleas} es la inercia de las poleas

i es la relación de reducción

⁴⁶ AUTOMATIONDIRECT. Manual sistema de motores paso a paso STP-SYS-MSP. 2005

Para realizar el cálculo de la inercia total, la inercia por reductor es cero debido a que no se implementa reductor, adicionalmente se tiene en cuenta el material de la correa el cual es caucho con sus respectivas dimensiones, de esta forma el cálculo de la inercia de las poleas se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 8. Inercia de poleas

$$J_{poleas} = (\pi * L * \rho * r^4) * 2$$

Donde

L es el espesor de la correa

ρ es la densidad del material de la correa

r es el radio de las poleas

$$J_{poleas} = \left(\pi * (0.005m) * \left(850 \frac{Kg}{m^3} \right) * (0.005m)^4 \right) * 2$$

$$J_{poleas} = 1.6689x10^{-8} Kg.m^2$$

La inercia de la carga se calcula a partir del peso y el radio de la polea de la siguiente manera.

Ecuación 9. Inercia de carga

$$J_w = 1Kg * (0.005m)^2$$

$$J_w = 2.5x10^{-5} Kg.m^2$$

De esta manera el cálculo de la inercia total sería.

$$J_{total} = (6.8x10^{-6} Kg.m^2) + 0 + \frac{1.6689x10^{-8} Kg.m^2 + 2.5x10^{-5} Kg.m^2}{1^2}$$

$$J_{total} = 3.1817x10^{-5} Kg.m^2$$

Una vez hallada la inercia total se procede a calcular el torque necesario de aceleración para vencer la inercia

Ecuación 10. Torque de aceleración

$$T_{acel} = \frac{J_{total} * rpm * 2 * \pi}{60}$$

Utilizando las revoluciones halladas previamente se obtiene el valor del torque de aceleración.

$$T_{acel} = \frac{3.1817 \times 10^{-5} \text{ Kg.m}^2 * 1528 \text{ rpm} * 2 * \pi}{60}$$

$$T_{acel} = 5.0911 \times 10^{-3} \text{ N.m}$$

Adicionalmente se calcula la resistencia que existe por fricción aplicando un coeficiente de 0.05 o por algún factor externo. Para este cálculo no se tiene en cuenta ningún factor externo. Por tanto el cálculo de torque de resistencia es de la siguiente manera.

Ecuación 11. Torque de resistencia

$$T_{resis} = \frac{F_{total} * r}{i}$$

Donde la F_{total} es la sumatoria de la fuerza de fricción y una fuerza externa

Ecuación 12. Cálculo Fuerza total

$$F_{total} = F_{ext} + F_{fric}$$

$$F_{total} = 0 + \mu * W * \cos\theta$$

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

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

Una vez se tiene el valor de resistencia, se calcula el torque de resistencia total.

$$T_{resis} = \frac{0.5 \text{ N} * 0.005\text{m}}{1}$$

$$T_{resis} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ N.m}$$

Finalmente el torque necesario para el motor se calcula a partir de la suma del torque de resistencia más el torque requerido para acelerar.

Ecuación 13. Torque total

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

$$T_{total} = 2.5 \times 10^{-3} N.m + 5.0911 \times 10^{-3} N.m$$

$$T_{total} = 7.5911 \times 10^{-3} N.m$$

Los valores obtenidos en los cálculos de torque son pequeños con respecto a los valores necesarios para selección de motores paso a paso a partir de tablas; debido a que se calcula un sistema de polea correa con dimensiones que no exceden los 2 cm, para una carga que tiene un peso de 1Kg. Por tanto se utilizarán parámetros de selección que han sido probados en el diseño y fabricación de impresoras 3D y se rigen bajo criterios de cargas en intervalos de torques. El primer factor es el de carga que está distribuido de la siguiente manera⁴⁷:

- Carga ligera: valores de torque entre 28 y 40 N*cm, aplicado en ejes que mueven bases ligeras (plástico o acrílico) o sin motor.
- Carga media el valor mínimo del par de motor debe superar los 40N*cm, implementados principalmente en ejes verticales, engranajes con ejes de reducción, motores montados o largas distancias de desplazamiento con la carga aplicada.
- Carga pesada, el valor mínimo de torque está comprendido entre los 50 y 60 N*cm, motores montados o largas distancias de desplazamiento con la carga aplicada.

Dado lo anterior se selecciona un motor paso a paso cuyo torque está comprendido entre el grupo de carga media y carga pesada. Además otro de los factores a tener en cuenta es la corriente, en el cual se busca un motor con corriente nominal baja con el fin de poder implementar un driver que sea capaz de entregar ese valor.

Los drivers son implementados con el fin de proteger la interfaz o tarjeta en la cual se encuentra la programación del motor, evitando que las conexiones del motor vayan directamente a la tarjeta y con ello prever posibles cortos o fallos; nominalmente se encuentran las siguientes corrientes:

- 0,6-0,7A
- 1,2-1,3A
- 1,7-1,8A
- 2,5A

⁴⁷ MOTORES PASO A PASO EN IMPRESIÓN 3D (II): Criterios de selección de motores y drivers [en línea] <http://www.dima3d.com/motores-paso-a-paso-en-impresion-3d-ii-criterios-de-seleccion-de-motores-y-drivers/>

De manera general la mayoría de los drivers para motores existentes se encuentran comprendidos entre los rangos de 1,2 a 1,8 A, por tanto se selecciona un motor que presente una corriente entre estos valores, junto con un driver que entregue el valor máximo de corriente requerida. El driver seleccionado es el driver POLOLU A4988, el cual entrega hasta 2A de corriente y permite la conexión del motor para ajustar los micropasos disponibles y con ello reducir las vibraciones y tener avances continuos sin la marca del paso.

Por lo tanto el motor seleccionado es el motor NEMA 17 HS8401, debido a que es el que presenta mayor torque con un valor de 52 N*cm, con el funcionamiento bipolar, una corriente de 1.7A como se ve en la Tabla 2, la cual puede ser suplida por el driver seleccionado, adicionalmente de los motores de mayor torque presenta menor valor de resistencia y un bajo valor de inductancia

Tabla 2. Especificaciones de motores NEMA17

Serie	Angulo de paso	Largo (mm)	Corriente (A)	Resistencia de fase (ohm)	Fase de inductancia (mH)	Torque (N.cm)	Inercia (g.cm ³)	No. Cables	Peso motor (g)
17HS2408	1.8	28	0.6	8	10	12	34	4	150
17HS3401	1.8	34	1.3	2.4	2.8	28	34	4	220
17HS3410	1.8	34	4.7	1.2	1.8	28	34	4	220
17HS3430	1.8	34	0.4	30	35	28	34	4	220
17HS4602	1.8	40	1.2	3.2	2.8	28	54	6	280
17HS8401	1.8	48	1.7	1.8	3.2	52	68	4	350
17HS8402	1.8	48	1.3	3.2	5.5	52	68	4	350
17HS8630	1.8	48	0.4	30	38	34	68	6	350

MOTION KING, MotionKing Motor Industry Co. Ltd. HB stepper motor catalog. 9p.

3.4 SELECCIÓN DE LA BOMBA

Existe gran variedad de bombas, sin embargo partiendo de la bomba seleccionada previamente por las características para el flujo de fluidos químicos, se procede a realizar el cálculo y selección de una bomba peristáltica que sea funcional en el sistema de spray pirólisis. Los parámetros de funcionamiento que se establecen son los siguientes:

- Caudal (Q): Se establece un valor máximo de caudal de 100 ml/min
- Velocidad del fluido (V): Una velocidad lineal del fluido de 400mm/s

Los valores previamente establecidos son tomados a partir de estudios realizados⁴⁸ previamente y parámetros de sistemas existentes en el mercado, sin embargo se

⁴⁸ TINA SEBASTIAN. Automation of Chemical Spray Pyrolysis Unit and Fabrication of Sprayed CuInS₂/In₂S₃ Solar Cell. Cochin University of Science and Technology. India. Thin Film Photovoltaic Division. 2009.

asume un caudal de trabajo mayor para garantizar un mayor flujo de la solución precursora hacia el sustrato.

La expresión en la cual se relaciona el caudal y la velocidad es la siguiente:

Ecuación 14. Caudal de solución

$$Q = V * A$$

Donde A corresponde a el área del tubo por donde se desplaza el fluido.

Ecuación 15. Cálculo de área

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

Por tanto, reemplazando la ecuación de área en la ecuación de caudal siendo D el diámetro de la tubería, se obtiene

$$Q = \frac{V * \pi * D^2}{4}$$

Despejando el diámetro y reemplazando los valores de caudal y de velocidad se obtiene la siguiente ecuación.

$$D = \sqrt{\frac{4 * \frac{100 \text{ ml}}{\text{min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1 \times 10^6 \text{ ml}}}{\pi * \frac{0.4 \text{ m}}{\text{s}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}}}} = 2.303 \times 10^{-3} \text{ m} = 2.303 \text{ mm}$$

El diámetro obtenido corresponde a un valor de 2.303 mm, sin embargo nominalmente y comercialmente no hay tuberías o mangueras, por tanto se aproxima a un diámetro de 2.5 mm para utilizar una manguera flexible que pueda ser implementada en la bomba peristáltica⁴⁹.

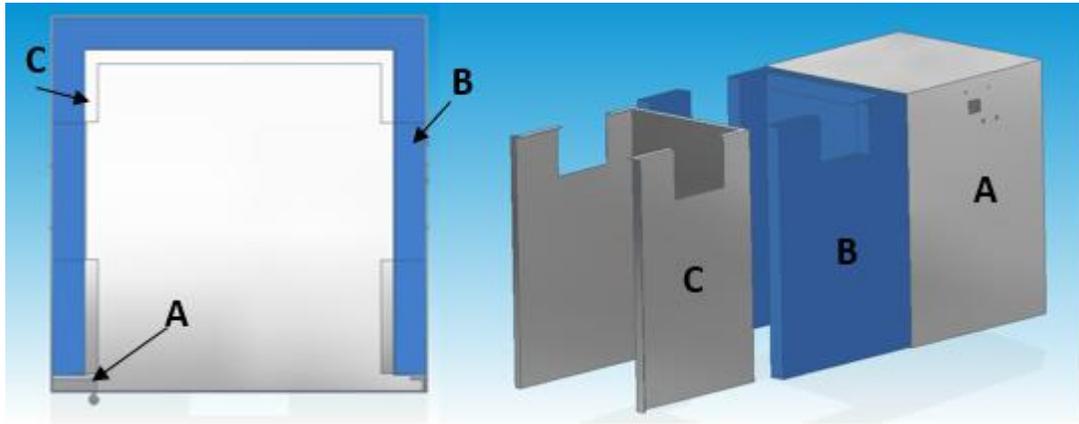
3.5 DISEÑO ESTRUCTURAL

Partiendo del diseño planteado para ser desarrollado en lámina de acero inoxidable AISI 304 calibre 18 (1.2mm) y teniendo en cuenta que el sistema de spray pirólisis debe llevar el aislamiento debido a las altas temperaturas empleadas, se diseña una

⁴⁹ BOMBA PERISTÁLTICA. Electronilab 2018.[en línea] <https://electronilab.co/tienda/bomba-de-dosificacion-peristaltica-12-vdc/>

estructura interna que funcione como una pared interna para ubicar el aislamiento térmico de manta cerámica el cual tiene un espesor de 1in.

Figura 9. Vista superior y explosionada de estructura.



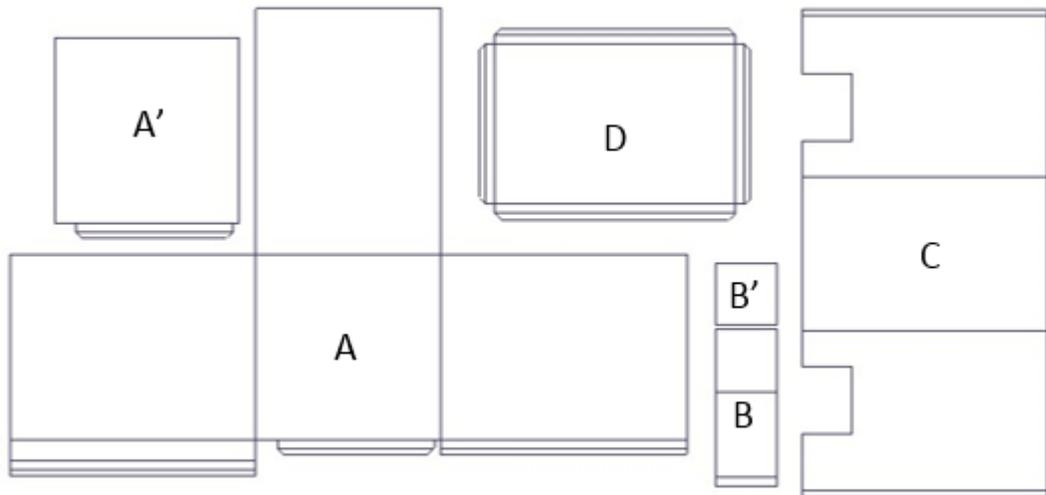
La disposición del aislamiento junto con la estructura externa e interna se indica en la Figura 9, donde A corresponde a la estructura externa, B corresponde al aislamiento de manta cerámica y C indica la estructura interna utilizada. Con lo cual se diseña la estructura externa con dimensiones de:

- Alto: 40 cm
- Ancho: 30cm
- Largo: 30 cm

De esta forma se garantiza que en la ubicación del bloque del aspersor es posible variar la distancia desde el aspersor hasta el sustrato en caso de requerirse entre los valores de 5 a 15 cm; a su vez para el movimiento del bloque por medio de la transmisión de correa-polea se le permite un desplazamiento sobre las líneas guía en una distancia de 14cm

Se procede a realizar el despiece de las estructuras con el fin de mostrar el desarrollo sobre una lámina de acero inoxidable AISI 304 calibre 18 como se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Despiece de las estructuras



En la Figura 10 se muestra el despiece de las estructuras de la siguiente manera:

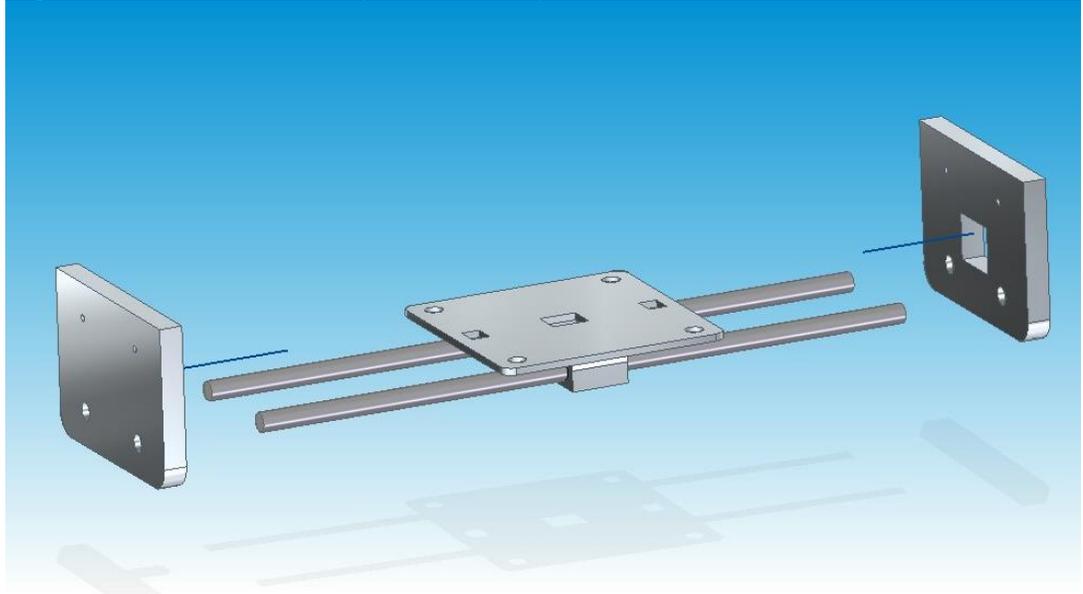
- A representa la estructura externa.
- A' representa la tapa de arriba.
- B representa el bloque del aspersor.
- B' la parte superior del bloque del aspersor.
- C representa la estructura interna como contrapared para ubicar el aislamiento.
- D representa la puerta de la máquina.

Con el fin de comprender el ensamble final del sistema spray pirólisis, se divide en dos partes:

- Sistema de aspersión: este corresponde al bloque del aspersor ensamblado a las líneas guía junto con los bloques en acero que fijan el sistema a la estructura de la máquina.
- Modulo fijo (estructura): el cual corresponde a la estructura externa e interna sobre lo cual se ensamblan los componentes, junto con el aislamiento y ensamblado el extractor.

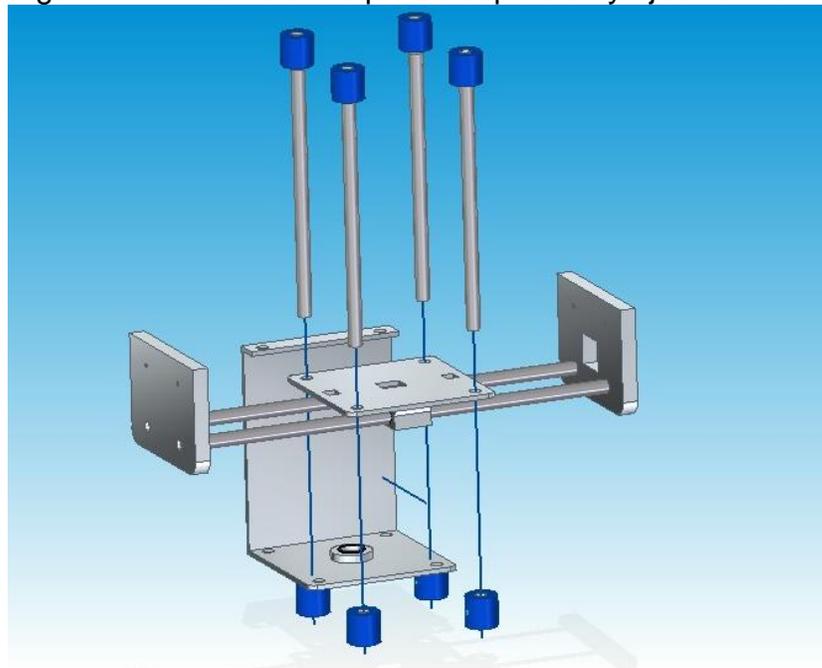
3.5.1 Ensamble sistema de aspersión. El ensamble comienza insertando los ejes horizontales o líneas guía a través de los rodamientos lineales que se encuentran anclados a la parte superior del bloque de aspersión. Con el fin de garantizar la distancia de separación y linealidad de las líneas guía, se ensamblan los bloques de los ejes como se muestra en la Figura 11, con los cuales se ensambla todo el sistema a la estructura, adicionalmente estos bloques soportan la carga de los ejes y el bloque del aspersor.

Figura 11. Ensamble bloques de los ejes.



Con las líneas guías ajustadas y los bloques ensamblados se procede a ensamblar el bloque del aspersor a la parte superior del bloque; para ello desde la parte trasera se acerca el bloque y se hacen pasar los cuatro ejes verticales por los agujeros, con el fin de dar rigidez al bloque.

Figura 12. Ensamble bloque de aspersión y ejes verticales.

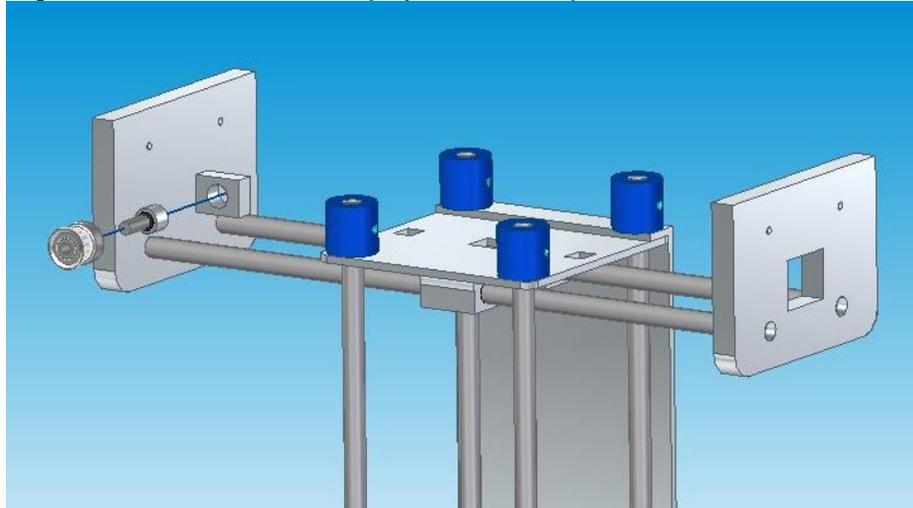


A los ejes verticales se le ensamblan unos acoples con tornillos Bristol en la parte inferior y superior como se ve en la Figura 12, los cuales permiten la variación de la

altura del bloque del aspersor, puesto a que la única parte totalmente fija en el eje x es la placa que lleva los rodamientos lineales. De esta forma se ajustan todos los acoples a la misma distancia para garantizar nivel y una altura especificada.

A continuación, se ensambla el eje del tensor de la polea, el cual se inserta en el agujero que se encuentra en el bloque de los ejes, una vez insertado se ensambla el tensor de la polea como se muestra en la Figura 13.

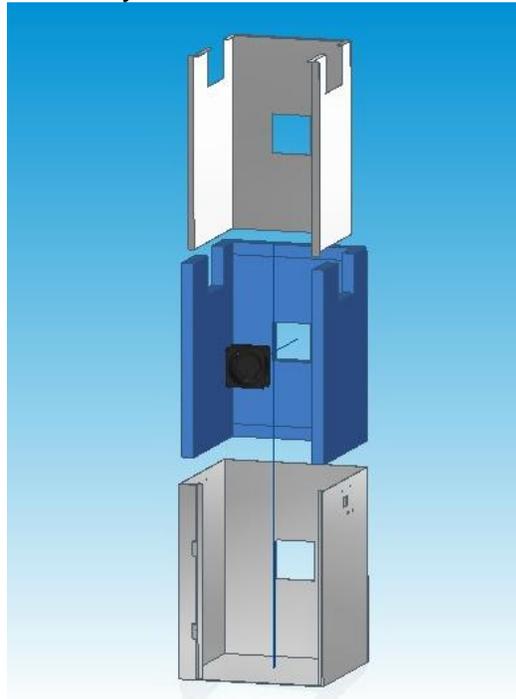
Figura 13. Ensamble de eje y tensor de polea.



3.5.2 Ensamble módulo fijo. La estructura externa se forma realizando los dobleces indicados una vez se tiene el despiece sobre la lámina de acero inoxidable AISI 304, una vez obtenidos los dobleces se procede a aplicar puntos de soldadura en las uniones de las caras laterales y posterior para dar rigidez a la estructura.

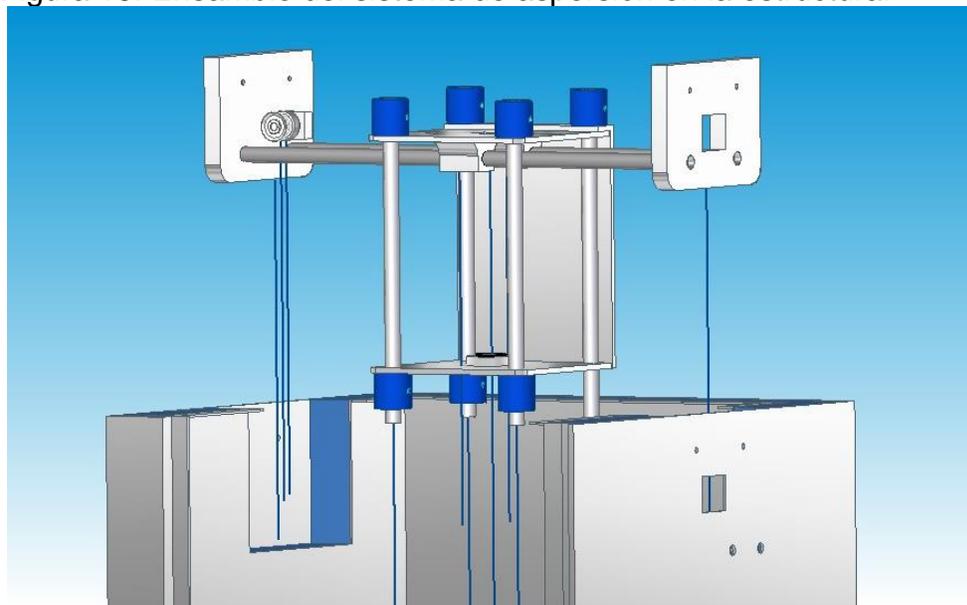
Una vez la estructura externa se encuentra terminada, se procede a insertar el aislamiento, dentro de la estructura interna, al cual se le introduce en el agujero que presenta, el extractor. Finalmente se inserta la estructura interna (Figura 14) para formar una contra pared que asegura el extractor y permitiendo que la manta cerámica quede situada entre la estructura interna y externa, generando mayor rigidez y estabilidad.

Figura 14. Ensamble de estructura interna y aislamiento.



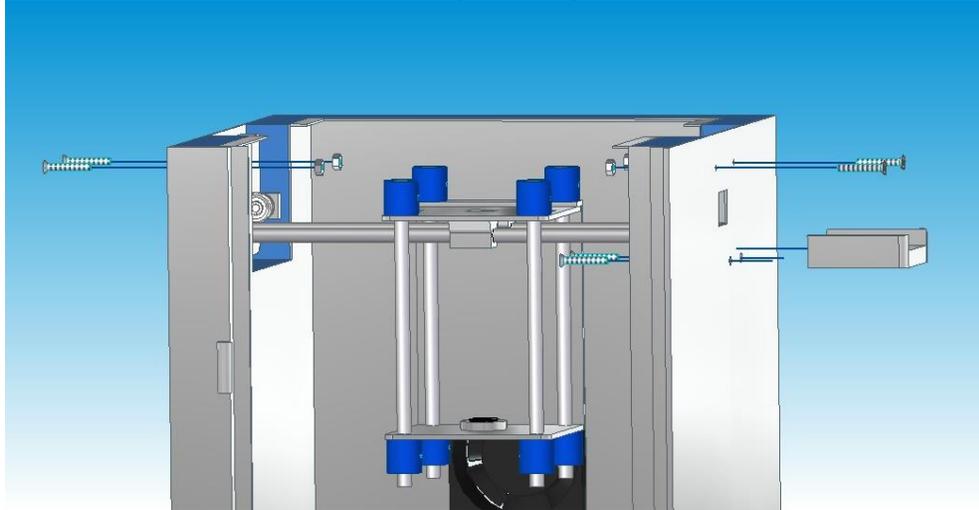
Con la estructura armada se procede a ensamblar el sistema de aspersión como se muestra en la Figura 15 desde la parte superior entre los espacios definidos por la estructura interna que permiten ubicar los bloques de los ejes.

Figura 15. Ensamble del sistema de aspersión en la estructura.



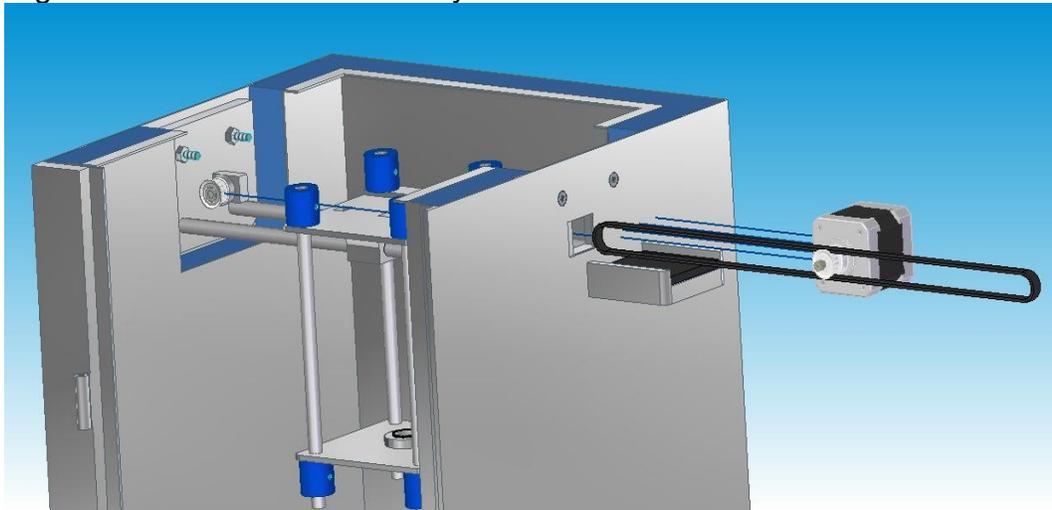
La unión de los bloques de los ejes con la estructura se realiza mediante tornillos, tuercas y arandelas; adicionalmente se ensambla la base del motor por medio de tornillos que anclan la base a la estructura como se ve en la Figura 16.

Figura 16. Unión del sistema de aspersión y base del motor a la estructura.



Con la base del motor ensamblada, se instala el motor NEMA 17, el cual en su eje tiene acoplada la polea por medio de un tornillo Bristol y se encuentra ubicado sobre un aislamiento acolchado con el fin de reducir las vibraciones y evitar que haya desplazamiento. Una vez se tienen alineados el tensor y la polea del motor, se ubica la correa haciéndola pasar por el agujero de la estructura (Figura 17) y verificando la tensión de la correa se amarra al bloque de aspersión.

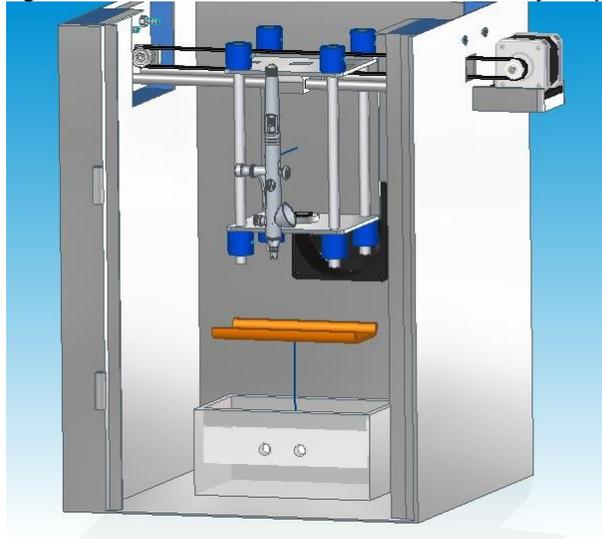
Figura 17. Ensamble del motor y la correa.



Con el motor instalado junto con la correa, se ubica el aspersor en el agujero del bloque del aspersor graduando la altura que se requiere a partir de los acoples

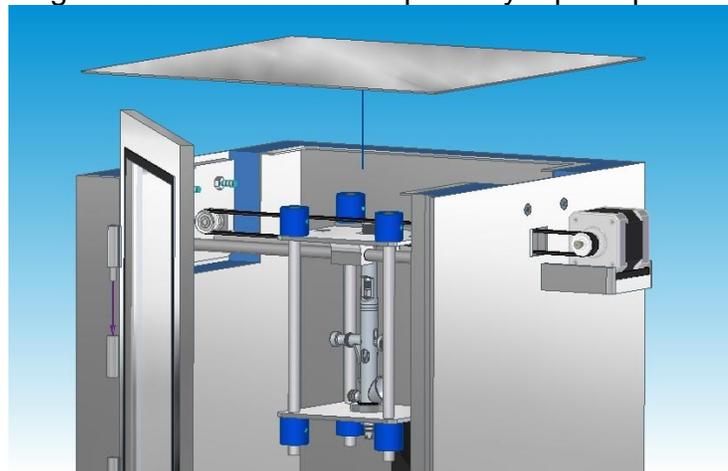
inferiores. Además, se ubica la caja de la resistencia con la resistencia cerámica internamente en la parte inferior de la máquina como se ilustra en la Figura 18 buscando centrarla con el aspersor, de esta forma asegurar que al realizar la aspersión, cubra toda el área donde se sitúan las películas.

Figura 18. Ensamble de la resistencia y aspersor.



Finalmente se ubica la puerta y la tapa superior ajustando los bordes con las caras de la estructura como se ve en la Figura 19, una vez ubicada la tapa superior, se une por medio de puntos de soldadura teniendo la precaución de permitir el enfriamiento de cada punto, debido a que se puede generar pandeo en la placa.

Figura 19. Ensamble de la puerta y tapa superior.



El ensamble final de la máquina para el sistema de spray pirólisis conformada por el sistema de aspersión y el modulo fijo se visualiza en la Figura 20.

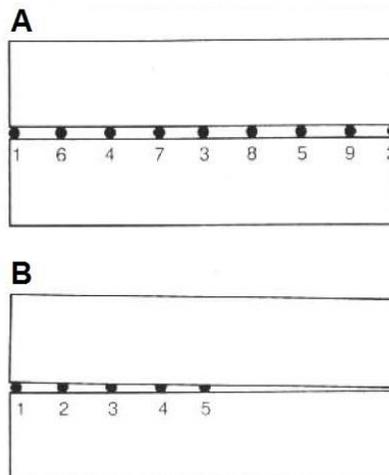
Figura 20. Ensamble final del sistema de spray pirólisis



3.6 SOLDADURA

Se implementa soldadura TIG y el método de soldado utilizado en el sistema spray pirólisis es el punteado en el cual se requiere la alineación de los bordes para así poder agregar material en forma de puntos. Dichos puntos dependerán de los espesores que presenten los materiales a unir, en el caso específico se tienen espesores de lámina calibre 18 que corresponde a 1.2 mm y se procede como se muestra en la Figura 21.

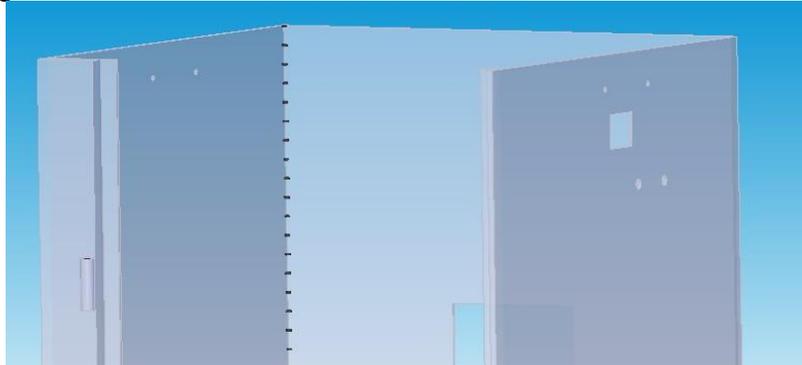
Figura 21. Esquema de los puntos de soldadura.



Para evitar la desalineación de las piezas durante el punteado, la secuencia de puntadas deberá comenzarse con un punto en cada extremo de la plancha, para posteriormente realizar otro punto en el centro mismo, según se muestra en la

Figura 21 parte A. y se debe proceder complementando con el resto de puntos a lo largo de la unión. Las puntadas que se dan para soldar las uniones son de aproximadamente 3 a 4mm como se indica en la Figura 22.

Figura 22. Soldadura TIG en uniones de la estructura externa.



Una vez realizado el proceso de soldadura, cuando las uniones se hayan enfriado, se procede a pulir los puntos soldados con el fin de mejorar la apariencia y evitar acumulación de material que generaran picos o puntas que pueden causar accidentes.

3.7 ANÁLISIS DE COMPONENTES POR ELEMENTOS FINITOS

Mediante el software NX 09 de SIEMENS, se realiza el análisis por elementos finitos de la estructura y los elementos más críticos de la máquina, los cuales están sometidos a la carga ejercida por el bloque del aspersor. Teniendo esto presente, se presentan los resultados obtenidos por el software y el análisis de los mismos, además en la Tabla 3 se listan algunas propiedades del material empleado en las estructuras.

Tabla 3. Propiedades del material de las estructuras.

Nombre del material	Acero inoxidable AISI 304
Límite elástico	276 Mpa
Esfuerzo último de tensión	572 Mpa
Dureza Rockwell B	80
Módulo de elasticidad	190000 Mpa

NKS México. [Consultado en 23/02/5:31:032018]. Disponible en http://www.nks.com/es/distribuidor_de_acero_inoxidable/acero_inoxidable_304.html

Se procede a simular los elementos críticos bajo las condiciones de operación creando enmallados iniciales y analizando la convergencia de malla a partir de nuevos resultados variando el tamaño de la malla; los resultados mostrados se realizan a partir de la malla refinada.

Adicionalmente se realizan los cálculos de los factores de seguridad con el fin de garantizar que los elementos analizados son funcionales, para ello se emplea la fórmula de factor de seguridad.

Ecuación 16. Factor de seguridad

$$F.S = \frac{\text{Lím. Elástico del material}}{\text{Esfuerzo máximo obtenido (Von Mises)}}$$

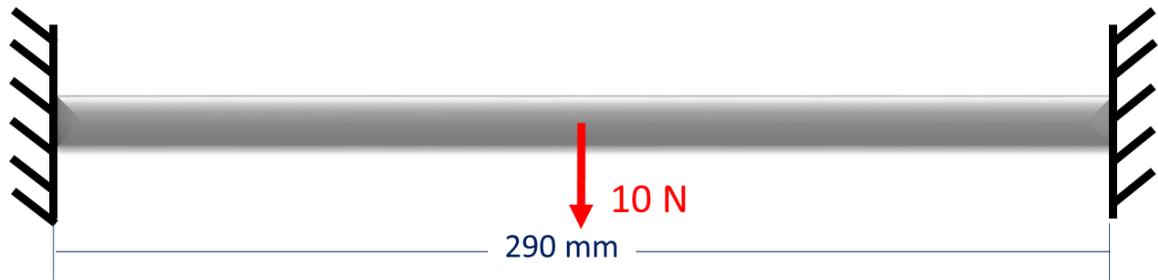
3.7.1 Análisis desplazamiento línea guía. Se inicia el análisis por elementos finitos con los ejes que corresponden a las líneas guía de diámetro de 8mm por los cuales se desplazará el bloque del aspersor a partir de los rodamientos lineales. Un fallo presentado en los ejes puede ocasionar que el sistema pierda nivel y por tanto la tolerancia de la holgura que existe entre los ejes y los rodamientos disminuirá causando fricción con los ejes, lo cual impedirá el desplazamiento del bloque y a su vez puede deteriorar la superficie de los ejes. Por tanto se requiere un mínimo desplazamiento del elemento; los tamaños de malla y los resultados obtenidos se muestran en el Tabla 4.

Tabla 4. Tamaños de malla utilizados en líneas guía.

Nombre del elemento	tamaños de malla utilizados (mm)	Desplazamiento (mm)	Esfuerzo elemental nodal (Mpa)
línea guía	6	0,0173	6,112
	4	0,0143	9,859
	2	0,0135	18,589
	1	0,0129	20,86

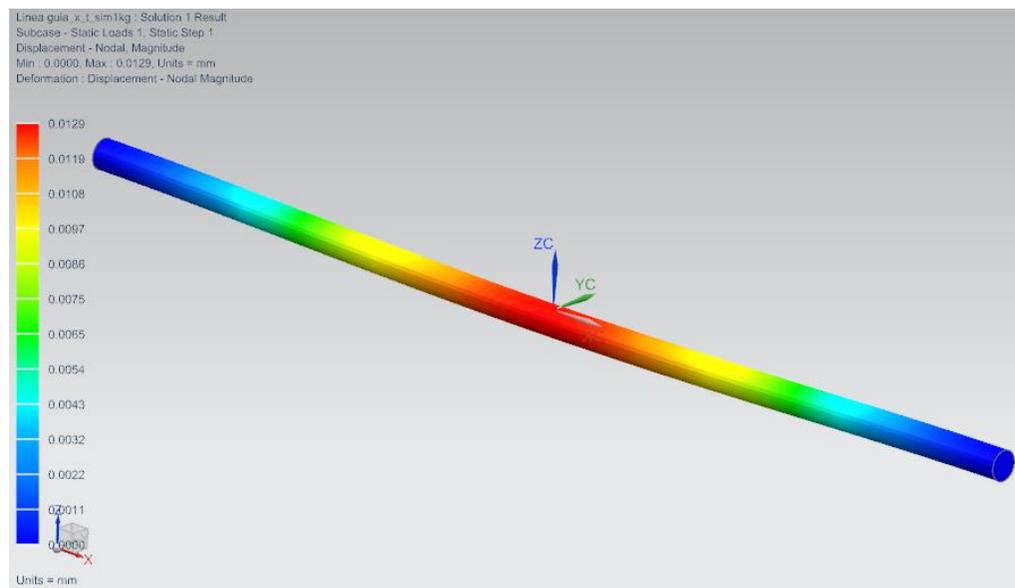
Se aplica una carga de 10 N calculada previamente, la cual corresponde a la carga total que ejercen los elementos que conforman el bloque del aspersor (estructura de bloque de aspersor, aspersor, rodamientos lineales, carga extra de motor). Adicionalmente se aplican restricciones en los extremos del eje debido a que se encuentra empotrado como se visualiza en la Figura 23.

Figura 23. Carga aplicada y restricciones de la línea guía.



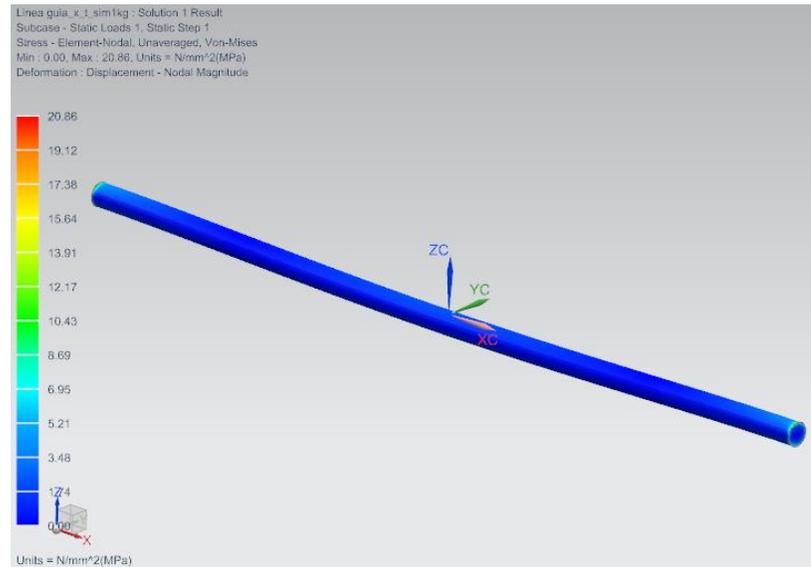
El desplazamiento máximo obtenido, como se muestra en la Figura 24, es de 0.0129 mm el cual se presenta en el centro del elemento; sin embargo el desplazamiento no es significativo y no influye en el ajuste con los rodamientos lineales. El desplazamiento máximo obtenido se simula en la línea guía implementando un tamaño de malla de 1mm tipo hexaédrico.

Figura 24. Resultado de desplazamiento en la línea guía.



3.7.2 Análisis de esfuerzo elemental nodal de la línea guía. El resultado máximo de esfuerzo Von mises es de 20.86 Mpa como se muestra en la Figura 25.

Figura 25. Resultados del esfuerzo elemental nodal en la línea guía.



Realizando el análisis del resultado obtenido y realizando el cálculo del factor de seguridad a partir del límite elástico del material y el esfuerzo máximo, se obtiene un factor de seguridad de 13.23 con lo cual se garantiza que el elemento analizado es funcional con el material y las dimensiones del diseño, adicionalmente los valores obtenidos en la simulación de.

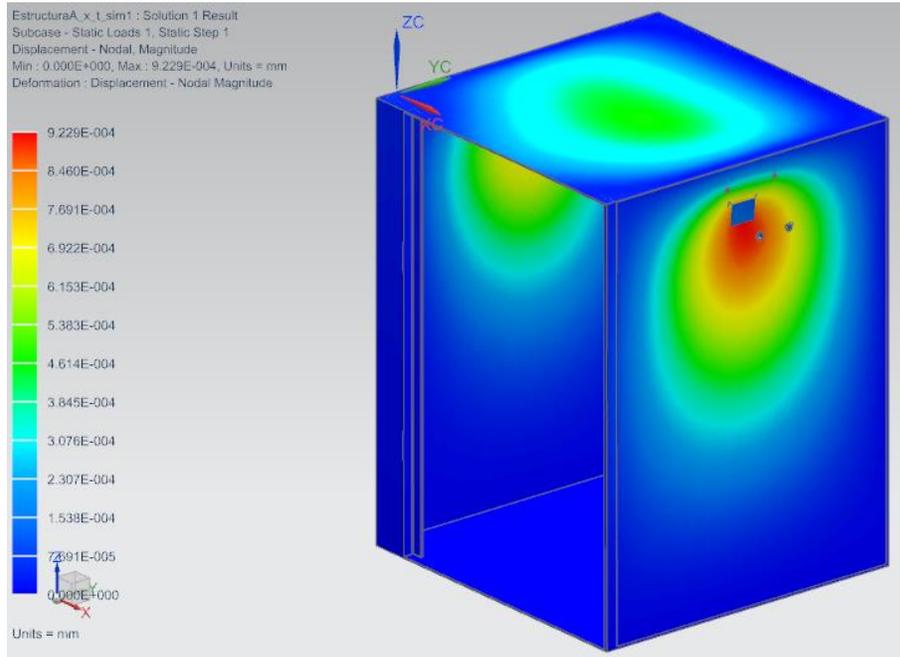
$$F.S = \frac{276 \text{ MPa}}{20.86} = 13.23$$

3.7.3 Análisis de desplazamiento en la estructura. Una vez realizado el análisis de la línea guía, se realiza el análisis de la estructura en la cual van asegurados los bloques que sostienen las líneas guía, de esta forma se determina la deformación y el esfuerzo soportado por la estructura al aplicar la carga del bloque del aspersor.

La carga de 10N del bloque junto con la carga de 12N adicionada de los bloques que sostienen las líneas guías se desplazan hasta los extremos para poder realizar el análisis por elementos finitos sobre la estructura. Adicionalmente se aplica la restricción en la parte inferior de la estructura.

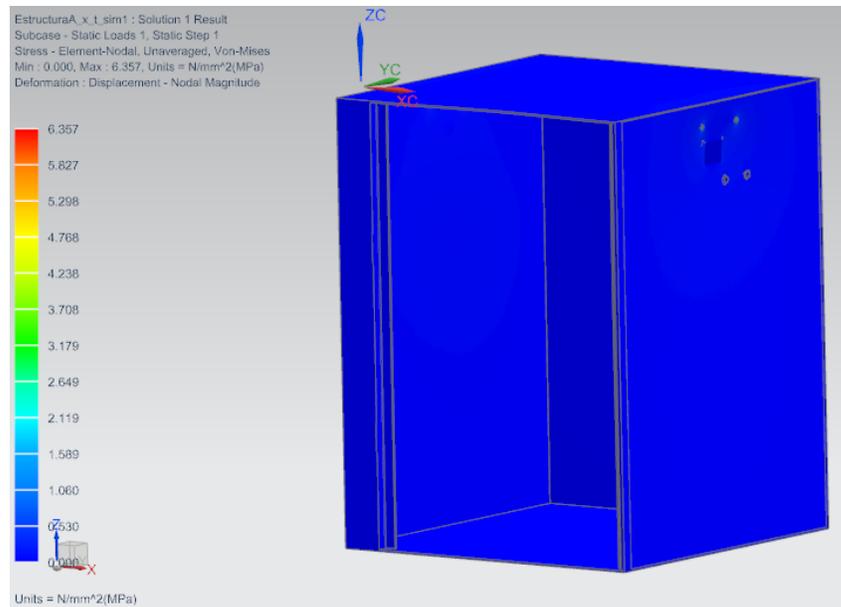
El desplazamiento máximo se obtiene aplicando una malla de tamaño 8mm (Figura 26) es de 9.229×10^{-4} mm el cual se presenta en el centro del elemento realizando convergencia de malla a partir de tamaños desde los 12mm; sin embargo el desplazamiento no es significativo y no influye en el ajuste con los rodamientos lineales.

Figura 26. Resultado de desplazamiento en la estructura.



3.7.4 Análisis de esfuerzo elemental nodal en la estructura. El resultado máximo de esfuerzo Von mises obtenido en la estructura es de 6.357 Mpa como se muestra en la Figura 27.

Figura 27. Resultados del esfuerzo elemental nodal en la estructura.



Por tanto realizando el análisis del resultado obtenido y el cálculo del factor de seguridad a partir del límite elástico del material y el esfuerzo máximo, se obtiene un factor de seguridad de 43.41 lo cual demuestra que el material seleccionado junto con las dimensiones de diseño son funcionales en la estructura; a pesar de que el factor de seguridad tiene un valor alto, es aconsejable implementarlo debido a futuros proyectos o arreglos que puedan implementarse en los subsistemas lo cual podría generar mayores cargas.

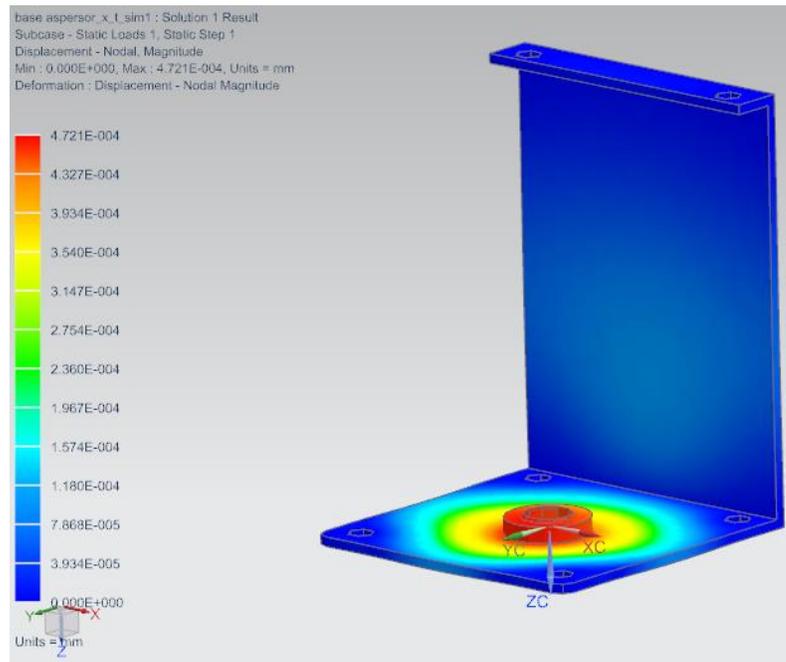
$$F.S = \frac{276 \text{ MPa}}{6.357} = 43.41$$

3.7.5 Análisis de desplazamiento en el bloque del aspensor. El bloque del aspensor es en donde se genera la carga que se aplica a las líneas guía y a la estructura, sin embargo, el bloque del aspensor debe soportar la carga del aerógrafo y adicionalmente una posible carga extra de un motor.

La carga de 5N del aspensor se ubica en el medio de la parte inferior del bloque de aspersión, el cual se sostiene por las líneas guías verticales como restricción por empotramiento que lo unen a la lámina superior con los rodamientos lineales.

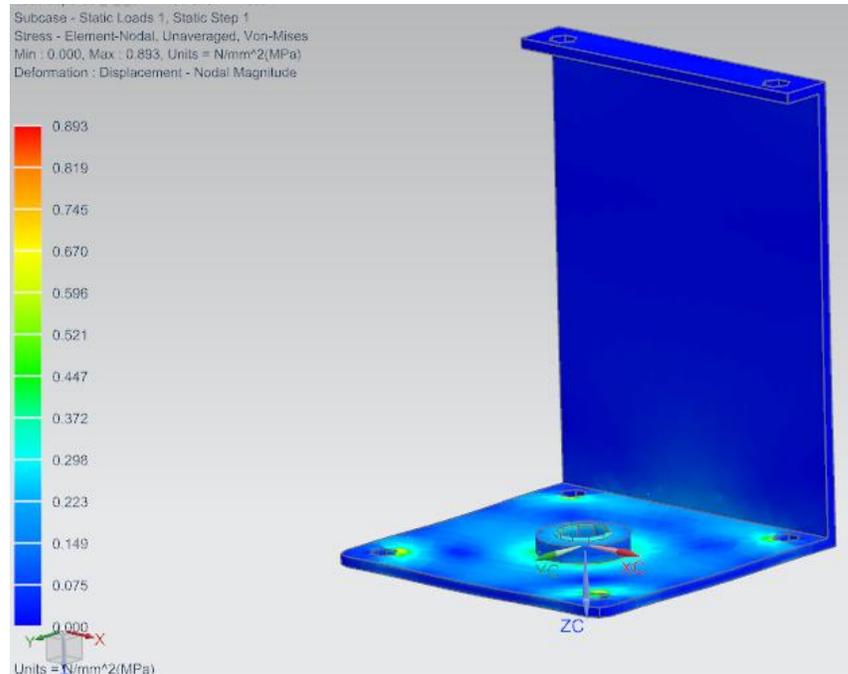
El desplazamiento máximo obtenido aplicando una malla de tamaño 8mm (Figura 28) es de 4.721×10^{-4} mm el cual se presenta en el centro del elemento; sin embargo el desplazamiento no es significativo.

Figura 28. Resultado de desplazamiento en el bloque del aspensor.



3.7.6 Análisis esfuerzo elemental nodal en el bloque del aspersor. El resultado máximo de esfuerzo Von mises obtenido en la estructura es de 0.893 Mpa como se muestra en la Figura 29. El cual es un valor insignificante debido a que el aspersor no genera un gran valor como carga en el bloque.

Figura 29. Resultados del esfuerzo elemental nodal en el bloque del aspersor.



Por tanto realizando el análisis del resultado obtenido y el cálculo del factor de seguridad a partir del límite elástico del material y el esfuerzo máximo, se obtiene un factor de seguridad de 309.07 lo cual demuestra que el material seleccionado y las dimensiones de diseño son funcionales en la estructura.

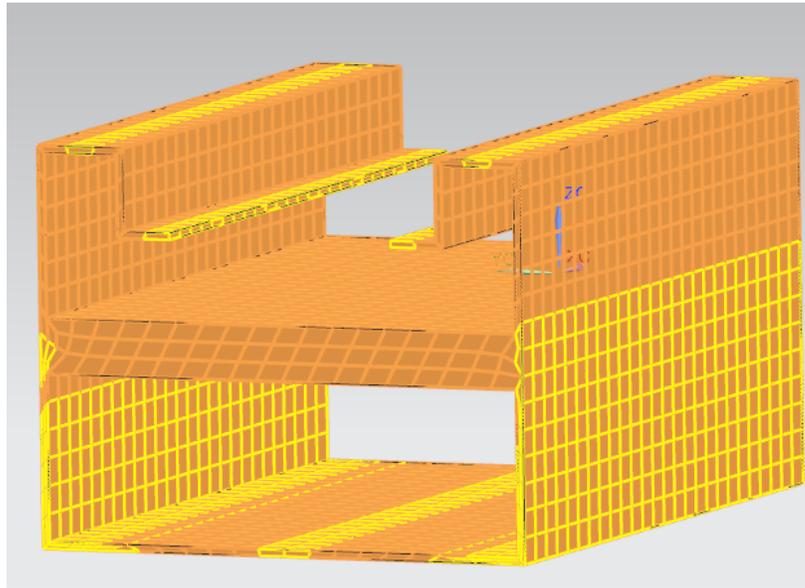
$$F.S = \frac{276 \text{ MPa}}{0.893} = 309.07$$

Sin embargo se emplea este tipo de diseño con el fin de eliminar movimientos y vibraciones que se presentan en los ejes verticales cuando el bloque se encuentra en movimiento y cuando se detiene para desplazarse en dirección contraria, lo cual causa una aspersión no homogénea y puede ocasionar desajustes entre los rodamientos lineales (anclados al bloque de aspersión por la parte superior) con las líneas guía.

3.7.7 Análisis térmico del bloque de calentamiento. Partiendo de los parámetros de funcionamiento del sistema se establece un análisis térmico del bloque de calentamiento.

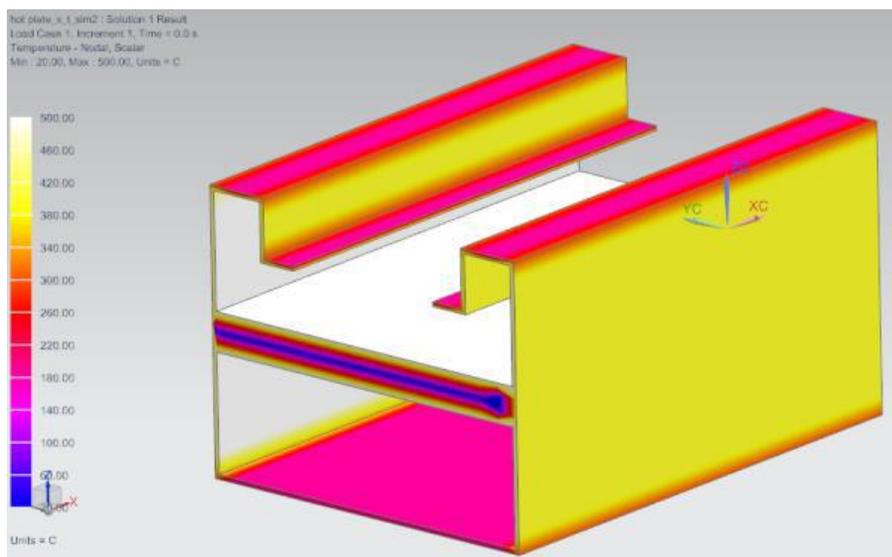
Se establece una malla estructurada de 5mm implementando HEXA8 y se procede a analizar la calidad de los elementos por la relación de aspecto como se ve en la Figura 30, no presenta elementos que generen errores.

Figura 30. Mallado de bloque de calentamiento



La temperatura de operación máxima planteada en la simulación es de 500°C con un flujo de calor desde la resistencia cerámica de calentamiento de 500W que corresponde a 21.59 W/in², el espesor del material es calibre 18 (1.2 mm). Las condiciones de borde se plantean a condiciones de ambiente, en el cual la presión corresponde a 1 atm y la temperatura 20°C. Obteniendo los resultados mostrados en la Figura 31.

Figura 31. Simulación de calentamiento en estado transitorio.



La simulación realizada se plantea como una generación de calor en estado transitorio hasta un tope máximo de temperatura de 500 °C, como se observa en la Figura 31, las temperaturas más altas se dan al interior del bloque, mientras las temperaturas en las paredes externas del bloque alcanzan valores de 300°C manteniendo en continuo durante 5 minutos.

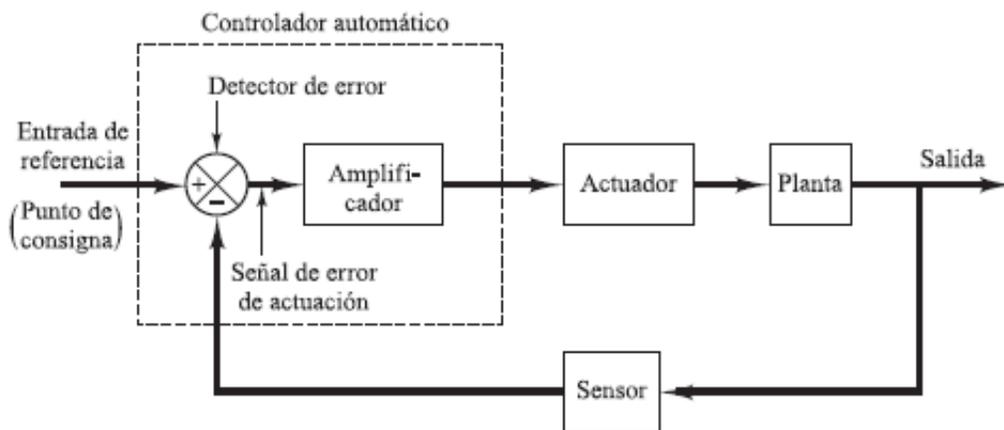
A partir de los resultados se establece el posicionamiento del aislamiento de manta cerámica para mitigar los efectos de transferencia de calor por las paredes externas del bloque de calentamiento, asegurando que las temperaturas más altas se mantienen en el interior y sobre las aletas en las cuales se soportan las películas que se desean modificar. Además, se verifica que el material y las dimensiones planteadas para el bloque de calentamiento son funcionales en esta aplicación, permitiendo alcanzar las temperaturas necesarias para la formación de películas delgadas.

4. DESARROLLO DE SOFTWARE

4.1 CONTROL DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

Partiendo de la teoría del control PID y del modelado del sistema de control a partir de los parámetros de las entradas y salidas del mismo es posible establecer un modelo que tenga en cuenta las características físicas y térmicas, propias de la planta. Para ello se tiene en cuenta las variables del proceso, y cuáles de ellas son constantes durante el funcionamiento. El esquema general del sistema controlado por PID es el siguiente en la Figura 32:

Figura 32. Esquema del lazo de control implementando PID.



A partir del control desarrollado para el sistema de calentamiento se pretende dar inicio a todo el sistema general de spray pirólisis, sin embargo los actuadores y sensores que le competen al control PID son los siguientes:

- Sensor termocupla tipo K
- Resistencia cerámica infrarroja de calentamiento.
- Extractor.

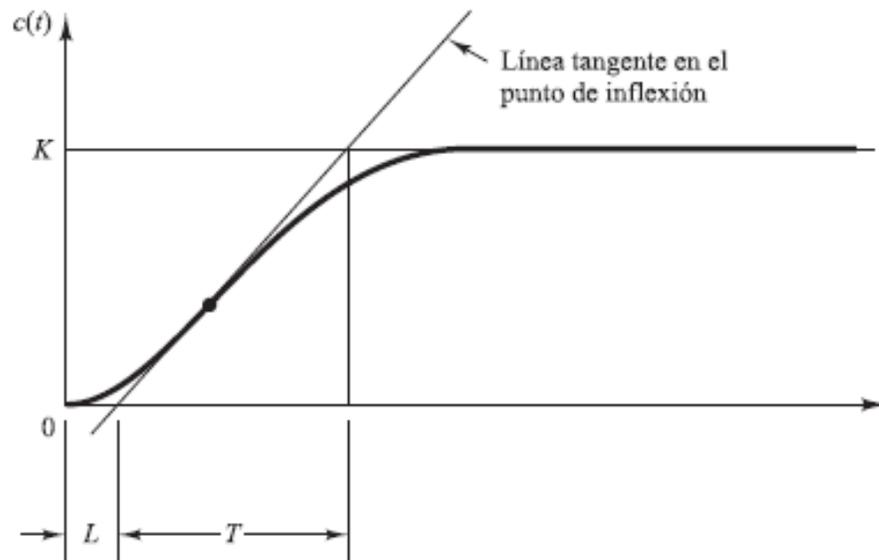
El PID en el software de control desarrollado en LabVIEW está basado en el método de control planteado por Ziegler and Nichols⁵⁰, es alimentado con la señal que es adquirida por la termocupla tipo K, la cual realiza sus mediciones de voltaje en unidades de mili voltios; este valor, por medio de una conversión de las unidades tomada del Anexo G en las cuales se establecen los valores de temperatura para las correspondientes mediciones de voltaje se muestra en la gráfica de temperatura

⁵⁰ PID and fuzzy logic Toolkit user manual. National Instruments. Chapter 2 pag 8.

y a su vez, el valor de la señal es pasada por las constantes proporcional, integral y derivativa, con el fin de acercarse al set point o entrada de referencia propuesto inicialmente y poder controlar de esta forma el funcionamiento de la planta.

Los valores de las constantes del control PID se hallan por el primer método de respuesta de una planta a una entrada de escalón unitario de manera experimental obteniendo una curva de respuesta como se muestra en la Figura 33 en la cual L corresponde a el tiempo de retardo en la cual se vence la inercia para iniciar el calentamiento y T que corresponde al tiempo que toma la planta en llegar al set point propuesto inicialmente⁵¹.

Figura 33. Curva de respuesta en forma de S



OGATA, Katsuhiko. Ingeniería De Control Moderna. Pearson Educación de México, S.A. de C.V, 2011. ISBN 9788483226605. pag 569

Los valores obtenidos de forma experimental para L y T son 20 seg y 270 seg respectivamente. A partir de estos valores se procede a aplicar la regla de sintonía de las constantes del controlador como se muestra en la Tabla 5.

⁵¹ OGATA, Katsuhiko. Ingeniería De Control Moderna. Pearson Educación de México, S.A. de C.V, 2011. ISBN 9788483226605. pag 569

Tabla 5. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón

Tipo de controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	inf	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	2L	0.5 L

OGATA, Katsuhiko. Ingeniería De Control Moderna. Pearson Educación de México, S.A. de C.V, 2011. ISBN 9788483226605. pag 570.

De esta manera aplicando los valores de L y T para las constantes Kp, Ti y Td para un controlador PID, los valores obtenidos de las constantes son los siguientes.

Ecuación 17. Cálculo de constantes del PID

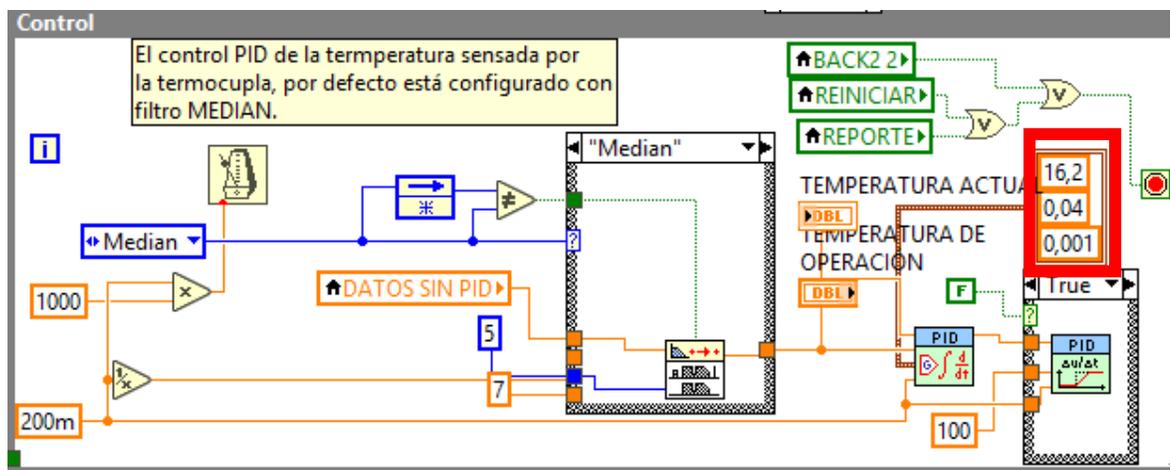
$$Kp = 1.2 * \frac{T}{L} = 1.2 * \frac{270}{20} = 16.2$$

$$Ti = 2L = 2 * 20 = 40$$

$$Td = 0.5L = 0.5 * 20 = 10$$

Una vez obtenidos los valores de las constantes, se aplican en el software de LabVIEW en la parte de control para la resistencia de calentamiento como se muestra en la Figura 34.

Figura 34. Diagrama de bloques aplicando las constantes del controlador.



En la Figura 34 se puede observar en la parte derecha en el cuadro rojo que se implementan las constantes obtenidas en el controlador una vez la señal ha sido filtrada para disminuir el ruido, partiendo de la temperatura actual y llevando este valor hacia la temperatura de operación (set point).

Una vez tenidos en cuenta las anteriores características, se plantea que en el panel frontal o interfaz del usuario puedan ser visualizados (Figura 35) los indicadores de funcionamiento del sistema indicando la temperatura obtenida en una gráfica una vez se ha realizado el código de programación.

Figura 35. Panel frontal del sistema PID implementado



4.2 CONTROL SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO Y ASPERSIÓN

El motor NEMA 17, ampliamente utilizado en la industria posee la facilidad de implementación de software de control que permite controlar la velocidad y la cantidad de pasos con drivers; permite a su vez la integración del control con el software de control global de la máquina. Las variables de control en el software del motor son la dirección en la cual gira el motor, la velocidad del motor y la cantidad de pasos.

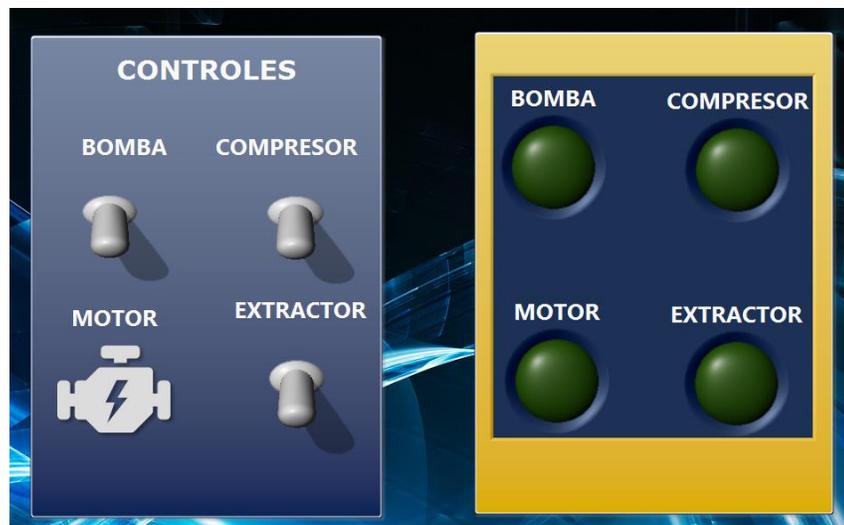
Para el control del motor, sin embargo, se diferencia del sistema de calentamiento debido a que se programa un número de veces que se debe ejecutar una acción y esta ocurre dentro de un ciclo (ciclo while en LabVIEW) en el cual se repetirá la acción programada hasta cuando se de una acción de parada, bien sea programada por un tiempo n o por una acción que envíe la señal de parada.

Con el fin de agrupar los subsistemas que involucran los parámetros para la obtención de películas de SnO₂:F funcionales, se integran en la programación de

control el control de los dispositivos de los sistemas de aspersión, bombeo y movimiento como se visualiza en la Figura 36; los cuales, a diferencia de la programación del control para el sistema de calentamiento, el control que se implementa es on/off como un sistema booleano donde lo único que se desea hacer es enviar la señal de encender o apagar. Los dispositivos a controlar son:

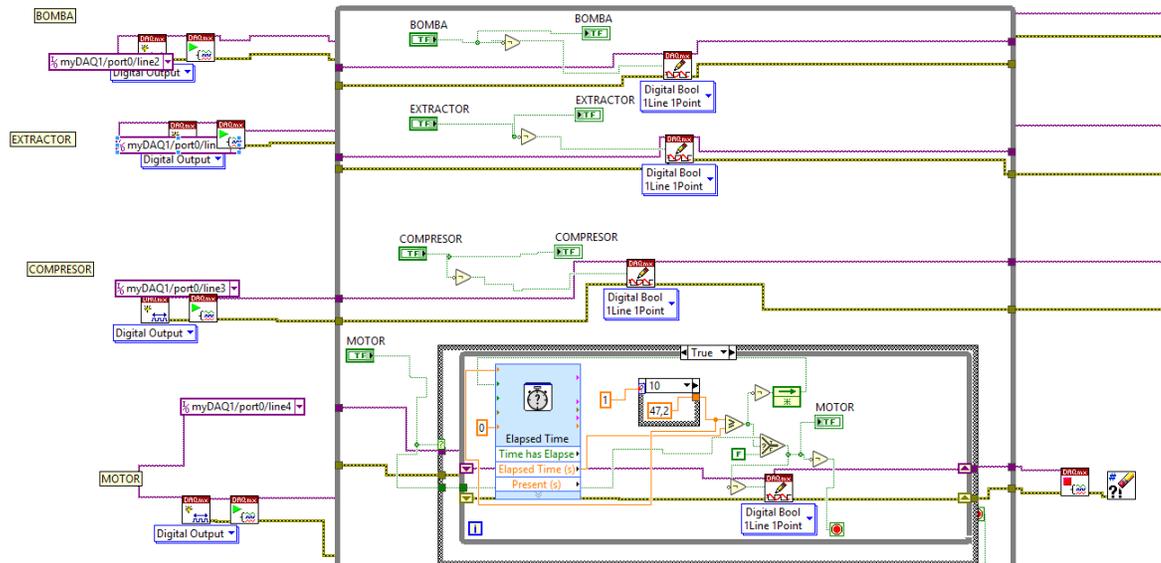
- Compresor
- Bomba peristáltica
- Motor NEMA 17
- Señal de encendido de Arduino UNO
- Extractor

Figura 36. Panel frontal para control de los dispositivos.



En la Figura 36 se visualiza un panel de controles en el lado izquierdo donde el usuario puede encender o apagar el dispositivo para verificar su funcionamiento previo al momento de realizar la aspersión del precursor sobre la película; en el lado derecho el usuario puede observar en los indicadores cuando el dispositivo se encuentra encendido o apagado. Los lazos de control para el accionamiento de los distintos dispositivos, se visualiza en la Figura 37.

Figura 37. Diagrama de bloques de los dispositivos.



En la Figura 37 se muestra el diagrama de bloques obtenido para el control de los dispositivos, partiendo de la selección del puerto para la salida digital y así poder controlar el dispositivo; seguido de un control booleano que permite decidir el momento en el que se debe realizar o no el encendido. Adicionalmente, el control del motor presenta un temporizador, en el cual se implementa una estructura de caso, dependiendo de la cantidad de ciclos que el usuario desea para el funcionamiento del motor.

5. RESULTADOS

5.1 RESULTADO CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA SPRAY PIRÓLISIS

El ensamble final del sistema spray pirólisis se muestra en la Figura 38, adecuando los demás componentes necesarios para el funcionamiento, los cuales se visualizan en la Figura 39, Figura 40 y Figura 41.

Figura 38. Montaje final del sistema con todos los dispositivos



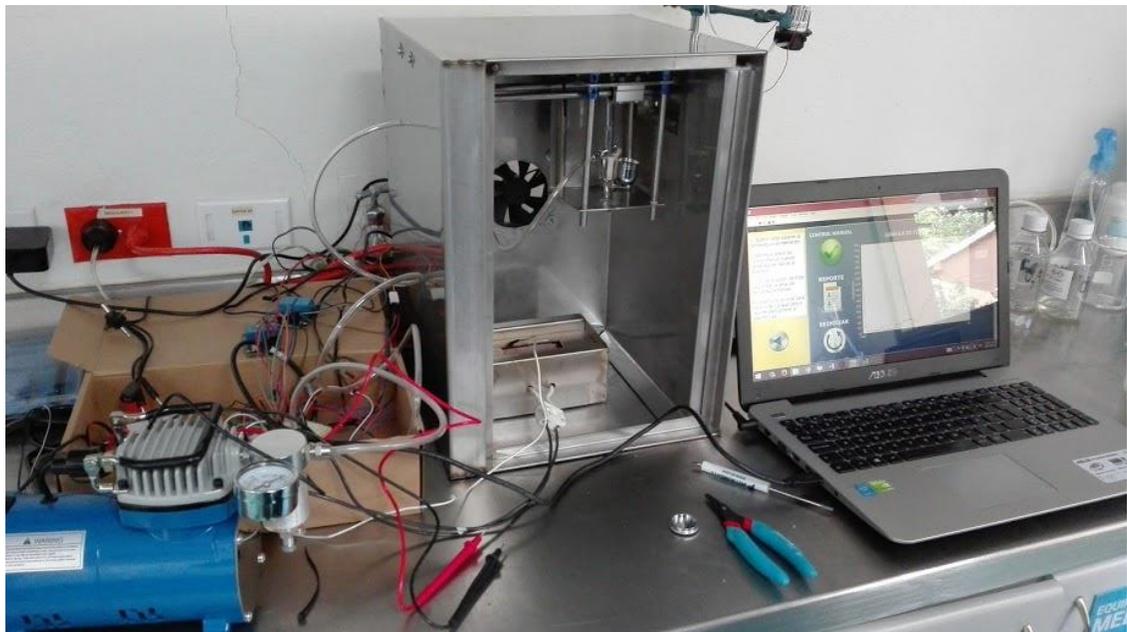
Figura 39. Bloque de la resistencia infrarroja.



Figura 40. Ensamble de bloque de aspersor en la estructura



Figura 41. Montaje final del sistema sin tarjeta electrónica



En el montaje real del sistema spray pirólisis se integra el sistema de circuitos y conexiones implementadas para el funcionamiento a partir del software desarrollado en LabVIEW como se muestra en la Figura 41, permitiendo realizar las acciones

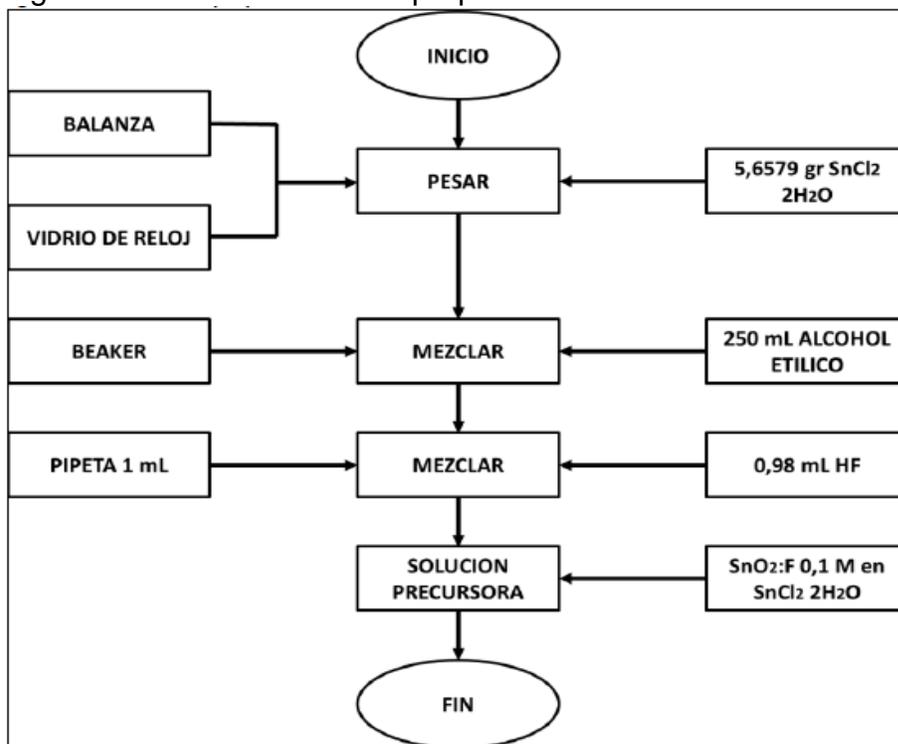
definidas para el sistema general tales como bombeo, compresión y aspersión de aire, extracción de gases, calentamiento y movimiento del aspersion. Los planos del ensamble final del sistema de aspersión y la estructura se encuentran en el Anexo H y Anexo I.

5.2 FORMACIÓN DE PELÍCULAS DE SnO₂: F

Para realizar el proceso de deposición de FTO por el sistema de spray pirólisis se utilizan vidrios soda lime los cuales fueron previamente lavados bajo el protocolo de lavado del Anexo J; una vez realizado el lavado, los vidrios son ubicados en el interior de la máquina sobre la superficie de calentamiento

5.2.1 Síntesis de películas de SnO₂: F. La solución precursora de SnO₂: F que es depositada sobre el vidrio debe estar correctamente preparada con el fin de conseguir una película delgada homogénea, como uno de los requisitos a cumplir en este tipo de materiales.

Figura 42. Procedimiento de preparación de SnO₂: F



RODRIGUEZ, CESAR. Diseño conceptual y construcción de un reactor de spray pirólisis para la síntesis de películas delgadas con aplicaciones fotoactivas. Fundación Universidad América. 2015

Este procedimiento se inicia con el peso de 5,6579 gr de SnCl₂ dihidratado en una balanza analítica, después se mezcla con 250 ml de alcohol etílico en un beaker, una vez realizada la mezcla se procede a agregar a esta solución 0,98 ml de HF

medidos en una pipeta de 1 ml, de esta forma se obtiene la solución precursora SnO₂:F al 0,1 M en SnCl₂ dihidratado⁵².

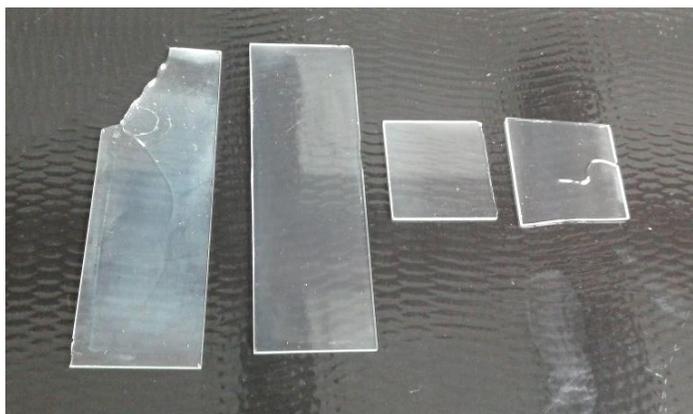
5.2.2 Películas obtenidas. Las películas de SnO₂: F obtenidas se realizaron variando las variables de temperatura, número de ciclos y altura del aspersor como se muestra a continuación en la Tabla 6, en los cuales para una misma altura fijando temperaturas se realizaban cambios en el número de ciclos con el fin de verificar la influencia de los mismos sobre el sustrato.

Tabla 6. Resultados obtenidos en pruebas preliminares.

Altura de 10 cm			
Temperatura	Número de ciclos	Transparencia	Homogeneidad
400	5	Mala	Mala
	8	Mala	Mala
	10	Mala	Regular
	20	Regular	Regular
450	5	Mala	Mala
	8	Regular	Regular
	10	Regular	Regular
	20	Regular	Buena

A pesar de que se realiza una deposición química del precursor de dióxido de estaño dopado con flúor sobre el sustrato bajo los parámetros generales, no se obtienen películas totalmente transparentes como se observa en la Figura 43 y se presenta aún una alta resistividad por parte de la película.

Figura 43. Muestras de pruebas preliminares de obtención de películas.



⁵² CESAR AUGUSTO RODRIGUEZ SEGURA. Diseño conceptual y construcción de un reactor de spray pirolisis para la síntesis de películas delgadas con aplicaciones fotoactivas. Fundación Universidad América. 2015.

A pesar de que la resistividad aun no es baja, se logra obtener homogeneidad sobre la superficie del sustrato indicando que se debe realizar ajustes en el sistema de calentamiento y en el sistema de aspersión con el fin de garantizar una correcta deposición química y obtener una película funcional.

Cabe aclarar que los gases finales de la reacción son extraídos del interior de la máquina, sin embargo el manejo adecuado de estos gases esta fuera del alcance de este proyecto,; por tal motivo se realizan las pruebas en una cámara de extracción en un laboratorio que permita darle un correcto manejo a los gases resultantes.

6. MANUALES

Con el fin de generar buenas prácticas de operación del sistema spray pirólisis se muestran los manuales de ensamblaje, operación de la máquina y mantenimiento. Los manuales adquieren una gran importancia para el uso del sistema y se realizan con el fin de garantizar una larga vida útil de los dispositivos y subsistemas de la máquina de spray pirólisis.

6.1 MANUAL DE OPERACIÓN

El sistema de spray pirólisis funciona a partir del software desarrollado en LabVIEW. Para la obtención de películas delgadas se requiere que previamente haya sido preparada la solución (precursor) que se atomiza, una vez preparada se debe depositar en un recipiente donde la bomba peristáltica pueda succionarla y bombearla hasta el aspersor. Adicionalmente se ubican los vidrios previamente lavados en la placa de calentamiento que se encuentra en la parte inferior de la máquina.

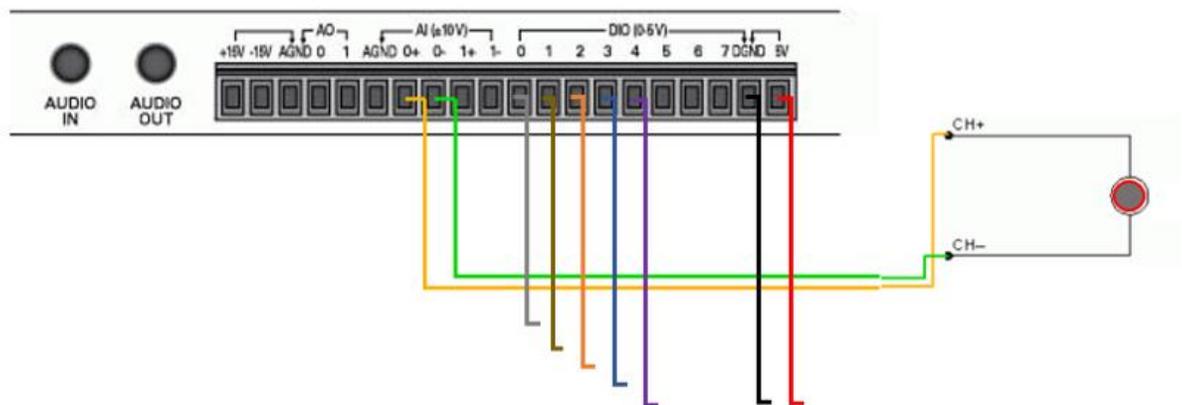
6.1.1 Conexiones. Para garantizar un correcto funcionamiento de la maquina previamente se deben verificar las conexiones y los voltajes de alimentación de los distintos dispositivos como se indica en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Voltajes de alimentación.

DISPOSITIVO	ALIMENTACIÓN
Tarjeta de adquisición de datos	Conexión al computador
Resistencia cerámica infrarroja	220V
Extractor	12V
Bomba peristáltica	12V
Compresor	110 V
Motor NEMA 17	12V
Circuito integrado	Conexión al computador o fuente de 5V a 12 V

Debido a que los dispositivos deben ser controlados a partir del software desarrollado, se implementan relés los cuales permitan realizar el control a partir de una señal booleana de entrada que active o desactive el relé según se encuentre su configuración, esta puede ser normalmente abierta o normalmente cerrada. Las conexiones de los dispositivos conectados en la myDAQ (dispositivo de adquisición de datos) se muestran en la Figura 44.

Figura 44. Diagrama de conexiones de la myDAQ



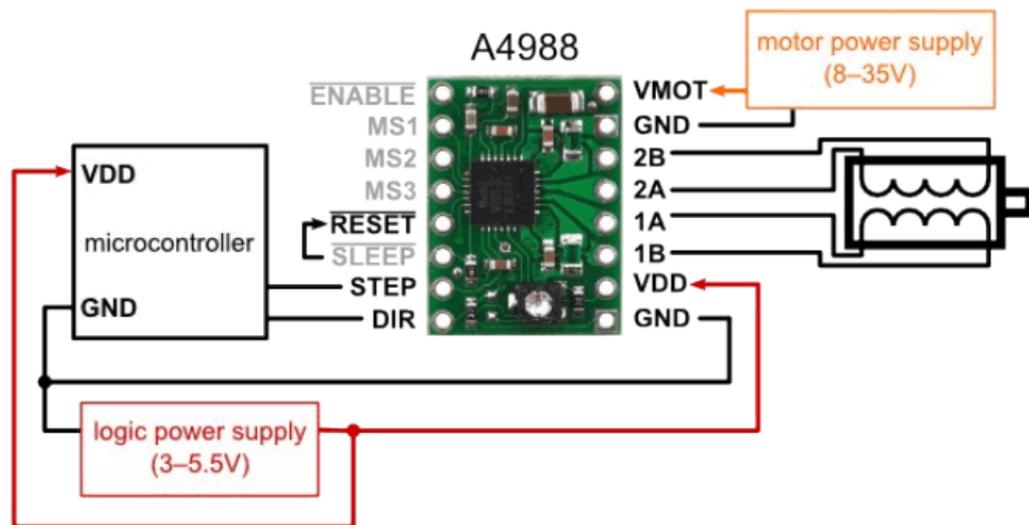
El diagrama de conexiones se muestra en la Figura 44, donde los puertos AI corresponden a la adquisición de datos análogos, los puertos DIO corresponden a puertos de salida y entrada digital, el puerto DGND se refiere al polo tierra y los 5V corresponde a un voltaje de salida para alimentar los distintos dispositivos.

Partiendo de lo anterior se listan los dispositivos asociados a las distintas conexiones realizadas en la tarjeta de adquisición de datos myDAQ donde:

- Puertos 0- y 0+ (cable amarillo y verde): Corresponden a los puertos de adquisición de datos a partir de la señal medida por la termocupla tipo K.
- Puerto D0 (cable gris): Salida digital para control encendido/ apagado de resistencia.
- Puerto D1 (cable marrón): Salida digital para control encendido/ apagado de extractor.
- Puerto D2 (cable naranja): Salida digital para control encendido/ apagado de bomba.
- Puerto D3 (cable azul): Salida digital para control encendido/ apagado de compresor.
- Puerto D4 (cable morado): Salida digital para control encendido/ apagado de motor.

El motor funciona a partir del driver POLOLU A4988 el cual se visualiza en la Figura 45; para que funcione de forma correcta se debe tener en cuenta los pines de conexión del driver.

Figura 45. Dispositivo driver POLOLU A4988



DRIVER POLOLU A4988. [Consultado en 20/12/11:25:2017]. Disponible en <https://www.staticboards.es/blog/drv8825-vs-a4988/>

En la Figura 45 se visualiza el esquema de conexión del driver y el motor. El significado y función de cada pin se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Pines del driver Pololu A4988.

ENABLE	Activa/desactiva las salidas al motor
MS1, MS2, MS3	Resolución del paso del motor
RESET	Corresponde al reset del motor
SLEEP	SLEEP
STEP	Controla el paso del motor
DIR	Controla la dirección del motor
VMOT	Alimentación del motor (12V)
2B, 2^a, 1^a, 1B	Pines para el conector del motor
VDD	Alimentación del driver del motor (5V)
GND	GND (tierra).

DRIVER POLOLU A 4988. Anonymous. 2018. Disponible en <https://www.staticboards.es/blog/drv8825-vs-a4988/>

7. CONCLUSIONES

- Se diseña un sistema spray pirólisis robusto, versátil y económico bajo los parámetros requeridos por el método de deposición química spray pirólisis, partiendo de las altas temperaturas de trabajo, la exposición a ambientes químicos y medidas con tolerancias que permiten el correcto funcionamiento de piezas móviles.
- A partir de la simulación del sistema de calentamiento en estado transitorio para el spray pirolisis se determina que es funcional y permite cumplir los parámetros, alcanzando temperaturas de 600°C permitiendo un calentamiento homogéneo reduciendo la transferencia de calor hacia las paredes externas de la máquina.
- Los análisis por elementos finitos de esfuerzos y desplazamientos de los componentes estructurales como líneas guía y estructuras del sistema spray pirolisis presentan factores de seguridad con valores altos, lo cual indica una reducción en los posibles fallos por desplazamientos y que los elementos diseñados son funcionales.
- El sistema de flujo de fluidos se adecúa en el sistema general de spray pirólisis implementando un sistema de movimiento y de esta forma obtener una aspersion homogénea con flujos constantes de aire y el precursor sobre la película.
- Se desarrolla un software de control del sistema spray pirólisis funcional a partir de LabVIEW facilitando la correcta operación de los dispositivos de aspersion, extracción, movimiento y calentamiento por cualquier usuario que desee operar el sistema.
- Una inexactitud en los datos de temperatura adquiridos por el sensor y en las concentraciones del precursor influye en los resultados morfológicos, de conductividad, homogeneidad y transparencia en las películas obtenidas.

8. RECOMENDACIONES

- Implementar otros sistemas de calentamiento que permitan homogeneizar la temperatura.
- Adecuar la termocupla en el sistema de calentamiento para realizar mediciones de temperatura de la película que se desea obtener.
- Realizar pruebas del spray pirólisis con la obtención de otros tipos de películas delgadas implementando otras soluciones precursoras.
- Realizar una extracción y correcto manejo de los gases finales obtenidos durante el proceso de funcionamiento de la máquina spray pirólisis.

BIBLIOGRAFÍA

A.A. Yadava, E.U. Masumdara, A.V. Moholkar. Electrical, structural and optical properties of SnO₂:F thin films: Effect of the substrate temperature. Journal of Alloys and Compounds.2009

ANDREAS Stadler. Transparent Conducting Oxides—An Up-To-Date Overview. University of Salzburg. Materials 2012

ANWAR, Sohail; EFSTATHIADIS, Harry and QAZI, Salahuddin. Handbook of Research on Solar Energy Systems and Technologies. 1st ed. US: IGI Global, 2013. ISBN 9781466619968

AUTOMATIONDIRECT. Manual sistema de motores paso a paso STP-SYS-MSP. 2005

BOMBA PERISTALTICA [en línea] <https://www.verderflex.com/es/como-funcionan-las-bombas-peristalticas-de-dosificacion/>

BOMBA PERISTÁLTICA. Electronilab 2018.[en línea] <https://electronilab.co/tienda/bomba-de-dosificacion-peristaltica-12-vdc/>

C O. Ayieko, R J. Musembi, S M. Waita, B O. Aduda and P K. Jain. Structural and Optical Characterization of Nitrogen-doped TiO₂ Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis on Fluorine Doped Tin Oxide (FTO) Coated Glass Slides. International Journal of Energy and Engineering. 2012.

CHOPRA, K. Thin Film Solar Cells. Op cit., p. 195 – 270.

CORREAS DE TRANSMISIÓN CÁLCULO Y DISEÑO [en línea] <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn121.html>

D.S. Albin and S.H. Risbud, Advanced Ceramic Materials,2(3A), 243 (1987).

DAE SOO JUNG, SEUNG BIN PARK, YUN CHAN KANG. Design of particles by spray pyrolysis and recent progress in its application. Korean J. Chem. Eng. 2010.

DAINIUS PEREDNIS. Thin film deposition by spray pyrolysis and the application in solid oxide fuel cells. 2003.

ENRIQUE CARNICER ROYO. Aire comprimido, 1977. p 247- 253.

FLORES-Carrasco G. &, Alcántara-Iniesta S. Propiedades estructurales, ópticas y eléctricas de películas de SnO₂ y SnO₂:F depositadas por rocío pirolítico

ultrasónico. CIDS-ICUAP Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Superficies y Vacío 27(4) 126-132, diciembre de 2014.

G. E. Patil, D. D. Kajale, V. B. Gaikwad, G. H. Jain. Spray. Pyrolysis Deposition of Nanostructured Tin Oxide Thin Films. International Scholarly Research Network ISRN Nanotechnology. 2012, p. 1-5

G. Korotcenkov, V. Brinzari. Peculiarities of SnO₂ thin film deposition by spray pyrolysis for gas sensor application. University of Michigan. Sensors and Actuators. 2001.

GERIQUE, T., et al. Aleaciones de Al-Cr-Zr para aplicaciones a altas temperaturas. En: REVISTA DE METALURGIA. Aug 30, vol. 34, no. 4, p. 358-373

HORNOS DE RESISTENCIA. Obtenido de: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.Hornos.RESISTENCIAS.2006.pdf>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 33p. c.

_____. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 36p. 2008.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá D.C.: El instituto, 1998. 23p.

K.G, Deepa. JAMPANA, Nagaraju. Development of an automated ultrasonic spray pyrolysis system and the growth of Cu₂ZnSnS₄ thin films. En: JOURNAL OF ANALYTICAL AND APPLIED PYROLYSIS. Jan. vol. 117, p. 141-146

KASTURI LAL CHOPRA, INDERJEET KAUR. Thin Film Device Applications. Indian Institute of Technology New Delhi, India. 1983.

LADO FILIPOVIC, MEMBER, IAENG, SIEGFRIED SELBERHERR, GIORGIO C. MUTINATI, ELISE BRUNET, STEPHAN Steinhauer Modeling Spray Pyrolysis Deposition. Proceedings of the World Congress on Engineering 2013 Vol II.

LILIA MARTINEZ PEREZ. Fabricación y caracterización óptica, estructural y eléctrica de películas delgadas transparentes de óxido de Estaño, Circonio y Zinc. Mexico. 2005.

M.T. Mohammada, A.A. Hashimb, M.H. Al-Maamory. Highly conductive and transparent ZnO thin films prepared by spray pyrolysis technique. Materials Chemistry and Physics, 2006. p. 382-387.

MOTORES PASO A PASO EN IMPRESIÓN 3D (II): Criterios de selección de motores y drivers [en línea] <http://www.dima3d.com/motores-paso-a-paso-en-impresion-3d-ii-criterios-de-seleccion-de-motores-y-drivers/>

N. Reuge, B. Caussat. A dimensionless study of the evaporation and drying stages in spray pyrolysis. Computers and Chemical Engineering 31. 2007.

NOTA TÉCNICA 2. Termocuplas, rev. b, <http://www.arian.cl>

OGATA, Katsuhiko. Ingeniería De Control Moderna. Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2011. ISBN 9788483226605. pag 7-8

PAULEAU, Yves. Chemical Physics of Thin Film Deposition Processes for Micro- and Nano-Technologies. Dordrecht: Springer, 2001. ISBN 1402005253

PID and fuzzy logic Toolkit user manual. National Instruments. Chapter 2 pag 8.

QUIÑONES. CESAR. Síntesis de películas transparentes y conductoras utilizadas en celdas solares sensibilizadas por colorantes. 2012.

R Groenen, J Löffler, P.M Sommeling, J.L Linden, E.A.G Hamers, R.E.I Schropp and M.C.M van de Sanden. Surface textured ZnO films for thin film solar cell applications by expanding thermal plasma CVD. Thin Solid Films. 2001.

R.Heikes y R.Ure, Science and Engineering of Thermoelectricity (Clarendon Press Co.,1961) - Capítulos 1,2 y 10

RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES [en línea] <http://www.inoxidable.com/corrosion.htm>

RODRIGUEZ CESAR. Diseño conceptual y construcción de un reactor de spray pirolisis para la síntesis de películas delgadas con aplicaciones fotoactivas. Fundación Universidad América. 2015.

S.K. SINHAA, R. BHATTACHARYAB, S.K. RAYC, I. MANNA. Influence of deposition temperature on structure and morphology of nanostructured SnO₂ films synthesized by pulsed laser deposition. Department of Metallurgical and Materials Engineering, Indian Institute of Technology. 2011.

SANCHEZ JOAN; SANCHIS MIGUEL; SANZ ESTEBAN. Introducción y aplicación en LabVIEW para el control de un proceso continuo mediante PID. Universidad politécnica de Cataluña, 1999.

SESHAN, KRISHNA Eds. Handbook of Thin Film Deposition - Techniques, Processes, and Technologies, 2012. ISBN: 9781437778748

SIEGFRIED SELBERHERR, LADO FILIPOVIC, , GIORGIO C. MUTINATI. Modeling and Analysis of Spray Pyrolysis Deposited SnO₂ Films for Gas Sensors. Transactions on Engineering Technologies. 2014. P. 295-310.

SILVA,Guillermo J.; DATTA,Aniruddha andBHATTACHARYYA,Shankar P. PID Controllers for Time-Delay Systems. Boston, MA: Birkhauser, 2005. ISBN 9780817642662

SOLDADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES [en línea]
<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn48.html>

SPRAY PYROLYSIS revisado en Noviembre 2017, disponible en
<https://www.sciencedirect.com/>

TINA SEBASTIAN. Automation of Chemical Spray Pyrolysis Unit and Fabrication of Sprayed CuInS₂/In₂S₃ Solar Cell. Cochin University of Science and Technology. India. Thin Film Photovoltaic Division. 2009.

VIRGINIA MAZZONE. Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes. Marzo 2002. Pag 3.

VIZCAÍNO, J. R. L., & SEBASTIÁ, J. P. LabView: entorno gráfico de programación. Marcombo. 2011.

ZURADA, A. Z., FAIRUZ, S. S., & RISBY, M. S. Conceptual Design of Wireless DAQ System for Vehicle Blast Testing. Procedia Computer Science, 2016, 94, 502-509.

ANEXOS

**ANEXO A.
PROPIEDADES DE MATERIALES METÁLICOS**

Tabla 4.1: Propiedades termofísicas de sólidos metálicos a 300 K

Descripción	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	k (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)
Acero puro	7870	447	80.2	23.1
Acero al carbono	7854	434	60.5	17.7
Acero al carbono-silicio	7817	446	51.9	14.9
Acero al carbono-Manganeso-silicio	8131	434	41.0	11.6
Acero con cromo (bajo)	7822	444	37.7	10.9
Acero inoxidable, AISI 302	8055	480	15.1	3.9
Acero inoxidable, AISI 304	7900	477	14.9	3.9
Acero inoxidable, AISI 316	8238	468	13.4	3.5
Acero inoxidable, AISI 347	7978	480	14.2	3.7
Aluminio puro	2702	903	237.0	97.1
Aluminio, aleación 2024-T6	2770	875	177.0	73.0
Aluminio, aleación 195, vaciado	2790	883	168.0	68.2
Armco (99.75% puro)	7870	447	72.7	20.7
Berilio	1850	1825	200.0	59.2
Bismuto	9780	122	7.86	6.6
Boro	2500	1107	27.0	9.8
Cadmio	8650	231	96.8	48.4
Cinc	7140	389	116.0	41.8
Circonio	6570	278	22.7	12.4
Cromo	7160	449	93.7	29.1
Cobalto	8862	421	99.2	26.6
Cobre puro	8933	385	401.0	117.0
Bronce comercial (90% Cu, 10% Al)	8800	420	52.0	14.0
Bronce fosforoso (89% Cu, 11% Sn)	8780	355	54.0	17.0
Latón (70% Cu, 30% Zn)	8530	380	110.0	33.9
Constantan (55% Cu, 45% Ni)	8920	384	23.0	6.7
Estaño	7310	227	66.6	40.1
Germanio	5360	322	59.9	34.7

COEFICIENTES CONVECCION CONDUCCION Frank P. Incropera y David P. DeWitt, "Fundamentos de la Transferencia de Calor" 4ª Ed., Prentice Hall, Méjico, 1999. Apéndice A.

ANEXO B. ESPECIFICACIONES DE RESISTENCIA CERAMICA INFRARROJA

Series CRC Curved Face Ceramic E-Mitters – Size: 60 mm × 122 mm (2.36" × 4.80")



Color shown is
rose (cold) to grey (hot)

Optional Features

- * Additional Power or Thermocouple Lead Lengths (page 7-23)
- * Two-Piece Wave Mounting Clip (page 7-14)
- * Reflectors and Other Accessories (pages 7-20 through 7-23)
- * Arrays and Power/Temperature Control Panels (start on page 7-15)

Standard (Non-Stock) CRC E-Mitters

E-Mitters listed have 3.50" ceramic bead insulated leads,
#8-10 spade terminals, and a one-piece spring clip for mounting.

Wattage	Voltage	Color	Watt Density*		Heater Body Temp.**		Part Number	
			(W/in ²)	(W/cm ²)	°F	°C	Without Thermocouple	With Type K Thermocouple
125	220/240	Rose to Grey	10.80	1.67	756	402	CRC10005	CRC10007
125	220/240	White	10.80	1.67	756	402	CRC00005	CRC00007
200	220/240	Rose to Grey	17.27	2.68	942	506	CRC10013	CRC10015
200	220/240	White	17.27	2.68	942	506	CRC00013	CRC00015
325	120	Rose to Grey	28.07	4.35	1156	624	CRC10018	CRC10020
325	120	White	28.07	4.35	1156	624	CRC00018	CRC00020
325	220/240	Rose to Grey	28.07	4.35	1156	624	CRC10021	CRC10023
325	220/240	White	28.07	4.35	1156	624	CRC00021	CRC00023
325	480	Rose to Grey	28.07	4.35	1156	624	CRC10064	CRC10140
325	480	White	28.07	4.35	1156	624	CRC00064	CRC00140
500	120	Rose to Grey	43.18	6.69	1420	771	CRC10024	CRC10026
500	120	White	43.18	6.69	1420	771	CRC00024	CRC00026
500	220/240	Rose to Grey	43.18	6.69	1420	771	CRC10027	CRC10029
500	220/240	White	43.18	6.69	1420	771	CRC00027	CRC00029
500	480	Rose to Grey	43.18	6.69	1420	771	CRC10066	CRC10141

Semi-Finished Stock CRC E-Mitters (Five Business Day Manufacturing)

Semi-Finished Series CRC E-Mitters listed below are stocked ready for color glazing. Colors available are metamorphing rose (cold) to grey (hot), traditional white, metamorphing yellow (cold) to orange (hot), and black.

They can be terminated with beaded leads up to 6" long with spliced-on lead wire for lengths beyond 6" and straight, ring, or spade terminals. Some are available with a thermocouple (any length).

A part number will be assigned at time of order.

Wattage	Voltage	Watt Density*		Heater Body**		Optional Thermocouple (Any Length)
		(W/in ²)	(W/cm ²)	°F	°C	
200	230	17.27	2.68	942	506	Type K
325	230	28.07	4.35	1156	624	Type K
325	480	28.07	4.35	1156	624	N/A
500	230	43.18	6.69	1420	771	Type K
500	480	43.18	6.69	1420	771	N/A

ANEXO C. PROPIEDADES DE MANTA CERÁMICA

DESCRIPCION

- Disponibles para entrega inmediata con diversas combinaciones de dimensiones y densidades.
- Baja conductividad térmica y energía térmica almacenada.
- Elevada resistencia a los choques térmicos y ataques químicos.
- Buenas características acústicas y de protección contra-fuego.
- Alta flexibilidad, facilitando cortes e instalación.

La manta es producida a partir de sílice y alúmina de alto grado de pureza. Resultando fibras refractarias totalmente inorgánicas, densificadas y entrelazadas para garantizar buena resistencia mecánica al manipuleo durante la instalación.



PROPIEDADES FISICAS

Color	Blanco
Densidad(kg/m ³).....	64-192
Espesor	3-51
Temperatura Máxima de Uso (°C).....	1100
Uso Límite	1260
Punto de Fusión (°C)	1760
Diámetro de las Fibras (μ,medio)	2,8
Largo de Fibras (cm,medio).....	10-25

COMPOSICION QUIMICA TIPICA

(% peso, después de quemado)

Alúmina (Al ₂ O ₃)	47
Sílice (SiO ₂)	53
Otros	trazos

(CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (Btu.in/ft².h.°F)
X TEMPERATURA MÉDIA(°F)) ASTM C 201

Temperatura media, 8 pcf	BTU.in/ft ² .h.°F	W/mK	Temperatura media, 4 pcf	BTU.in/ft ² .h.°F	W/mK
500°F (260°C)	0.44	0.06	500°F (260°C)	0.54	0.08
1000°F (538°C)	0.87	0.12	1000°F (538°C)	1.29	0.19
1500°F (816°C)	1.45	0.21	1500°F (816°C)	2.30	0.33
1800°F (982°C)	1.83	0.26	1800°F (982°C)	2.96	0.43
2000°F (1093°C)	2.09	0.30	2000°F (1093°C)	--	--
Temperatura media, 6 pcf					
500°F (260°C)	0.47	0.07			
1000°F (538°C)	1.01	0.15			
1500°F (816°C)	1.73	0.25			
1800°F (982°C)	2.19	0.32			
2000°F (1093°C)	--	--			

**ANEXO D.
ANALISIS DEL SISTEMA DE MOVIMIENTO DEL SPRAY**

Mover Spray				
	Ventajas	Desventajas	componentes	costos (+IVA)
Motor polea-correa	<ul style="list-style-type: none"> Control para altas velocidades a partir de software (hasta 6000 pasos/seg 01800 rpm) Menor consumo de energía. (12-24 V) Menor ruido Fácil mantenimiento. Componentes más económicos. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere líneas guías Paradas a muy altas velocidades no son precisas en los extremos debido al peso del elemento móvil. Desajuste de tensión de la correa genera truncamientos en el desplazamiento. Pesos superiores a 4 Kg son más complejos de desplazar. Requiere programación especial para funcionamiento. 	Motor paso a paso Controlador motor 2 Poleas 1 correa Líneas guía 2 Rodamientos lineales Bloque acople aspensor	\$60.000 \$9.000 \$18.000 (2Und) \$9.000 \$15.000 \$50.000 (2Und) \$25.000 TOTAL \$ 186.000
Cilindro neumático	<ul style="list-style-type: none"> A mayores velocidades se reducen interferencias en movimiento. Carrera de avance garantizado. Más robusto Programación de funcionamiento más sencillo 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere líneas guías para conservar linealidad del vástago. Mayor peso en la punta= mayor diámetro= mayor costo Compresor alimentación más grande (+ 70 psi) Requiere mayor espacio para adecuar Parada y arranque brusco Pérdidas de aire en la válvula genera truncamientos en desplazamiento. Componentes más costosos. 	Cilindro diam 10, 15mm de carrera Válvula 5/2 2 Reguladores de flujo 2 racores Acople roscado aspensor Manguera Líneas guía	\$120.000 \$105.338 \$40.000 (2Und) \$4.600 (2Und) \$ 15.000 \$4.000 \$50.000 TOTAL \$ 338.938
No Mover				
	Ventajas	Desventajas	componentes	costos (+IVA)
Sistema fijo	<ul style="list-style-type: none"> Menor cantidad de dispositivos Menor consumo de energía Más robusto 	<ul style="list-style-type: none"> El control de flujo de solución y aire debe ser más preciso, por tanto se requieren dispositivos de mayor precisión Mayor precisión en los parámetros de altura, diámetro de la aspersión y temperatura para adecuación. Lazos de control entre los parámetros deben tener respuestas rápidas, es decir un control PID de alta gama. Sube los costos en los dispositivos de aspersión y bobeo de la solución. 	Bloques de acoples fijos para los dispositivos.	menor costo de instalación.

**ANEXO E.
PARTES DEL AERÓGRAFO DOBLE EFECTO**

**AERÓGRAFO DE DOBLE
ACCIÓN, CON DEPÓSITO
DE GRAVEDAD.
TIPO AB-300**



- 1 - Boquilla.
- 2 - Cabezal.
- 3 - Boquilla de salida, Pico.
- 4 - Cuerpo del aerógrafo.
- 5 - Gatillo.
- 6 - Palanca del gatillo.
- 7 - Aguja.
- 8 - Soporte de la aguja.
- 9 - Muelle de retroceso.
- 10 - Ajustador del muelle.
- 11 - Tornillo de retención de la aguja.
- 12 - Mango de serie.
- 13 - Tornillo de seguridad.
- 14 - Válvula de parada.
- 15 - Cuerpo de la válvula.
- 16 - Émbolo de la válvula.
- 17 - Muelle de retroceso del émbolo.
- 18 - Cierre tope del muelle.

ANEXO F. SELECCIÓN DE CORREA DENTADA

CORREAS DE TIEMPO

Las tres dimensiones principales que forman la referencia de una correa dentada de tiempo son:

Longitud - Paso - Ancho

Longitud

Es el largo de la correa (circunferencia) tomado en pulgadas sobre la línea del paso por donde corren sus cuerdas de tensión.

Ejemplo: **800 H 150**
 longitud
 80 pulgadas

Paso

Es la distancia en pulgadas existente entre un diente y el siguiente. Son cinco pasos y a cada uno le corresponde una letra para su referencia así:

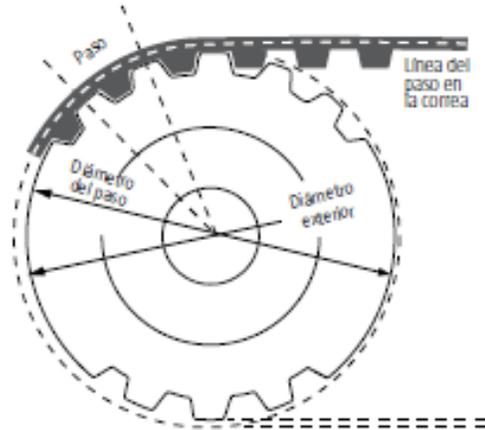
PASO	LETRA
1/5"	XL
3/8"	L
1/2"	H
7/8"	XH
1-1/4"	XXH

Ejemplo: **800 H 150**
 paso 1/2"

Ancho

Se mide en pulgadas y se expresa al final de la referencia.

Ejemplo: **800 H 150**
 ancho 1,5 pulgadas



1/5 PASO "EXTRA - LIGERO" (XL)



3/8 PASO "LIGERO" (L)



1/2 PASO "PESADO" (H)



7/8 "EXTRA - PESADO" (XH)



1-1/4 PASO DOBLE "EXTRA - PESADO" (XXH)



FUENTE: INTERMEC CATALOGS.

**ANEXO G.
TABLA DECONVERSIÓN DE TERMOCUPLA TIPO K**

100	4.095	4.137	4.178	4.219	4.261	4.302	4.343	4.384	4.426	4.467
110	4.508	4.549	4.590	4.632	4.673	4.714	4.755	4.796	4.837	4.878
120	4.919	4.960	5.001	5.042	5.083	5.124	5.164	5.205	5.246	5.287
130	5.327	5.368	5.409	5.450	5.490	5.531	5.571	5.612	5.652	5.693
140	5.733	5.774	5.814	5.855	5.895	5.936	5.976	6.016	6.057	6.097
150	6.137	6.177	6.218	6.258	6.298	6.338	6.378	6.419	6.459	6.499
160	6.539	6.579	6.619	6.659	6.699	6.739	6.779	6.819	6.859	6.899
170	6.939	6.979	7.019	7.059	7.099	7.139	7.179	7.219	7.259	7.299
180	7.338	7.378	7.418	7.458	7.498	7.538	7.578	7.618	7.658	7.697
190	7.737	7.777	7.817	7.857	7.897	7.937	7.977	8.017	8.057	8.097
200	8.137	8.177	8.216	8.256	8.296	8.336	8.376	8.416	8.456	8.497
210	8.537	8.577	8.617	8.657	8.697	8.737	8.777	8.817	8.857	8.898
220	8.938	8.978	9.018	9.058	9.099	9.139	9.179	9.220	9.260	9.300
230	9.341	9.381	9.421	9.462	9.502	9.543	9.583	9.624	9.664	9.705
240	9.745	9.786	9.826	9.867	9.907	9.948	9.989	10.029	10.070	10.111
250	10.151	10.192	10.233	10.274	10.315	10.355	10.396	10.437	10.478	10.519
260	10.560	10.600	10.641	10.682	10.723	10.764	10.805	10.846	10.887	10.928
270	10.969	11.010	11.051	11.093	11.134	11.175	11.216	11.257	11.298	11.339
280	11.381	11.422	11.463	11.504	11.546	11.587	11.628	11.669	11.711	11.752
290	11.793	11.835	11.876	11.918	11.959	12.000	12.042	12.083	12.125	12.166
300	12.207	12.249	12.290	12.332	12.373	12.415	12.456	12.498	12.539	12.581
310	12.623	12.664	12.706	12.747	12.789	12.831	12.872	12.914	12.955	12.997
320	13.039	13.080	13.122	13.164	13.205	13.247	13.289	13.331	13.372	13.414
330	13.456	13.497	13.539	13.581	13.623	13.665	13.706	13.748	13.790	13.832
340	13.874	13.915	13.957	13.999	14.041	14.083	14.125	14.167	14.208	14.250
350	14.292	14.334	14.376	14.418	14.460	14.502	14.544	14.586	14.628	14.670
360	14.712	14.754	14.796	14.838	14.880	14.922	14.964	15.006	15.048	15.090
370	15.132	15.174	15.216	15.258	15.300	15.342	15.384	15.426	15.468	15.510
380	15.552	15.594	15.636	15.679	15.721	15.763	15.805	15.847	15.889	15.931
390	15.974	16.016	16.058	16.100	16.142	16.184	16.227	16.269	16.311	16.353
400	16.395	16.438	16.480	16.522	16.564	16.607	16.649	16.691	16.733	16.776
410	16.818	16.860	16.902	16.945	16.987	17.029	17.072	17.114	17.156	17.199
420	17.241	17.283	17.326	17.368	17.410	17.453	17.495	17.537	17.580	17.622
430	17.664	17.707	17.749	17.792	17.834	17.876	17.919	17.961	18.004	18.046
440	18.088	18.131	18.173	18.216	18.258	18.301	18.343	18.385	18.428	18.470
450	18.513	18.555	18.598	18.640	18.683	18.725	18.768	18.810	18.853	18.895
460	18.938	18.980	19.023	19.065	19.108	19.150	19.193	19.235	19.278	19.320
470	19.363	19.405	19.448	19.490	19.533	19.576	19.618	19.661	19.703	19.746
480	19.788	19.831	19.873	19.916	19.959	20.001	20.044	20.086	20.129	20.172
490	20.214	20.257	20.299	20.342	20.385	20.427	20.470	20.512	20.555	20.598
500	20.640	20.683	20.725	20.768	20.811	20.853	20.896	20.938	20.981	21.024
510	21.066	21.109	21.152	21.194	21.237	21.280	21.322	21.365	21.407	21.450
520	21.493	21.535	21.578	21.621	21.663	21.706	21.749	21.791	21.834	21.876
530	21.919	21.962	22.004	22.047	22.090	22.132	22.175	22.218	22.260	22.303
540	22.346	22.388	22.431	22.473	22.516	22.559	22.601	22.644	22.687	22.729
550	22.772	22.815	22.857	22.900	22.942	22.985	23.028	23.070	23.113	23.156
560	23.198	23.241	23.284	23.326	23.369	23.411	23.454	23.497	23.539	23.582
570	23.624	23.667	23.710	23.752	23.795	23.837	23.880	23.923	23.965	24.008
580	24.050	24.093	24.136	24.178	24.221	24.263	24.306	24.348	24.391	24.434
590	24.476	24.519	24.561	24.604	24.646	24.689	24.731	24.774	24.817	24.859

ARIAN CONTROL & INSTRUMENTACION. Tablas de termocuplas y pt 100. [Consultado en 05/10/07:26:2017]. Disponible en <http://www.arian.cl/espanol/support.htm>

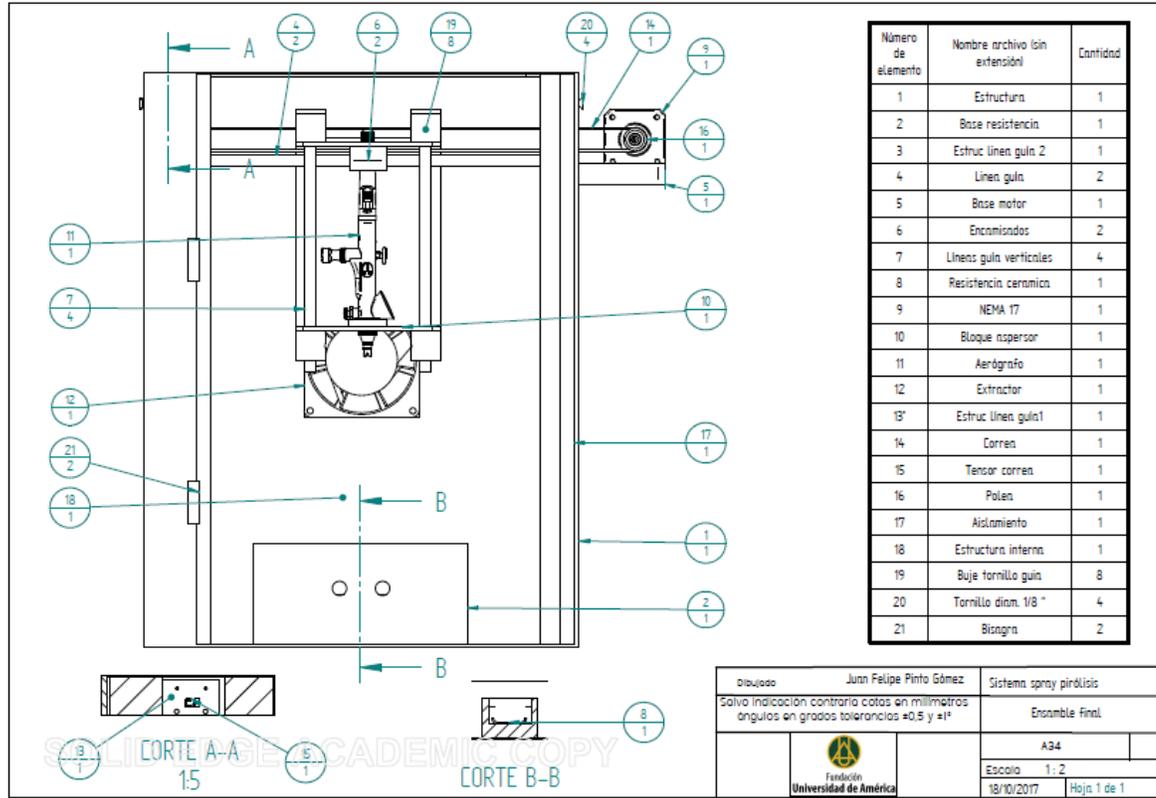
ANEXO H. PLANO FINAL DEL BLOQUE DE ASPERSIÓN

Número de elemento	Nombre del elemento	Cantidad
1	Estruc línea guía 2	1
2	Línea guía	2
3	Base motor	1
4	Encamisados	2
5	Líneas guía verticales	4
6	NEMA 17	1
7	Bloque aspersor	1
8	Aerógrafo	1
9	Estruc línea guía 1	1
10	Correa	1
11	Tensor correa	1
12	Correapolea	1
13	Buje tornillo guía	8
14	Tornillo diam. 1/8"	4

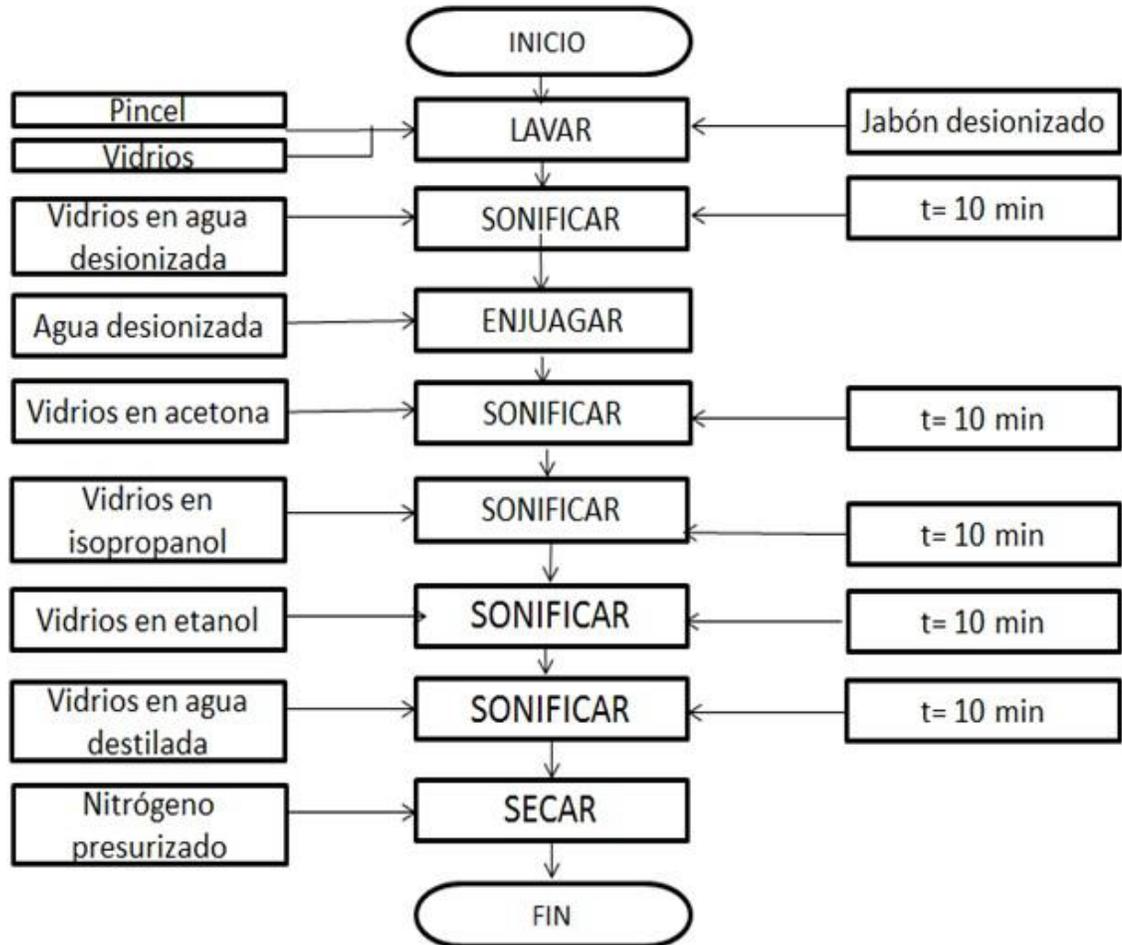
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Dibujado	Juan Felipe Pinto Gómez	Sistema spray piróclisis
Salvo indicación contraria cotos en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Bloque de aspersión
		A34
Escala		1 : 2
18/10/2017		Hoja 1 de 1

ANEXO I. PLANO ENSAMBLE FINAL



ANEXO J. PROTOCOLO DE LAVADO DE VIDRIOS



Fuente: Yessica Avila; Diego Laverde. Evaluación de la degradación de un plaguicida organofosforado por medio de fotocatalisis con dióxido de titanio. Trabajo de grado Universidad de América. Facultad de Ingeniería. 2015.