

Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica



**Diseño de un sistema de posicionamiento para la sonda de
Langmuir del Stellarator de Costa Rica 1**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de
Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Andrés Felipe Coto Brenes

Cartago, 16 de noviembre de 2017

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Andrés Felipe Coto Brenes

Cartago, 16 de noviembre de 2017

Céd: 3-0487-0103

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica
Proyecto de Graduación
Tribunal Evaluador

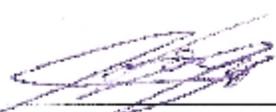
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Dr. Iván Vargas Blanco
Profesor Lector

MSc. Alberto Garro Zavaleta
Profesor Lector



Lic. Jaime Mora Meléndez
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el Área Académica de Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 16 de noviembre de 2017

Agradecimientos

Le agradezco de la manera más sensata a mis padres, hermanos y toda la familia por el apoyo incondicional, la motivación y la ayuda brindada para realizar con éxito el proyecto y, en general, por todo el tiempo y dedicación a lo largo de toda la carrera.

El resultado de este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo de Jaime Mora y en general de todo el equipo de investigadores de PlasmaTEC, a ellos les agradezco la oportunidad de formar parte del laboratorio y por todos los aportes y comentarios que me mantuvieron enfocado en el desarrollo del proyecto.

De igual forma le agradezco a mis compañeros y amigos que de alguna forma también fueron parte importante para llevar a cabo el proyecto y la carrera.

Andrés Felipe Coto Brenes

Cartago, 16 de noviembre de 2017

Resumen

La fusión nuclear ofrece múltiples ventajas frente a otras formas alternativas de obtención de energía. Ante este panorama, la investigación en dispositivos para lograr fusión controlada ha sido llevada a cabo por expertos en todo el mundo, donde los dispositivos de confinamiento magnético como el stellarator y el tokamak son las principales líneas de investigación. En Costa Rica se encuentra uno de los seis dispositivos stellarator del mundo: el Stellarator de Costa Rica 1 o SCR-1.

La investigación en fusión nuclear es paralela a la investigación de plasmas, donde se cuenta con múltiples dispositivos para caracterizar al plasma. Uno de los dispositivos es la sonda de Langmuir, el cual sirve para medir la densidad, potencial y temperatura del plasma mediante unos electrodos metálicos que se introducen en el plasma.

La sonda generalmente cuenta con un sistema de posicionamiento, ya que las mediciones de la sonda son locales y en dispositivos de fusión se realizan mediciones a lo largo del borde del plasma. Los plasmas de fusión alcanzan temperaturas de millones de grados Celsius y para evitar la destrucción de los electrodos inmersos en el plasma, se reduce el tiempo de inserción mediante movimientos de alta velocidad.

El SCR-1 cuenta con una sonda de Langmuir y un posicionamiento manual de la misma, lo que implica que la sonda es estática durante la descarga del plasma y para realizar mediciones a lo largo del borde son necesarias múltiples descargas, lo que involucra varias horas de trabajo y también resultados no constantes.

El objetivo de este informe es mostrar el diseño de un sistema de posicionamiento automático para desplazamientos de alta velocidad. El diseño consiste en todo el sistema de posicionamiento de la sonda, que incluye los componentes de vacío, el movimiento axial y el control automático del mismo.

El sistema de posicionamiento cumple con los requerimientos que exponen los investigadores del Laboratorio de Plasmas para Fusión Nuclear y Aplicaciones del ITCR, donde se encuentra el SCR-1. Este sistema alcanza velocidades de hasta $3.5m/s^2$ y ofrece la ventaja, frente a otros dispositivos similares, que se utiliza un único actuador para distintos movimientos.

Palabras clave: fusión, sonda, Langmuir, posicionamiento, vacío, servomotor

Abstract

Nuclear fusion offers multiple advantages over other alternative forms of obtaining energy. Faced with this panorama, research on devices to achieve controlled fusion has been carried out by experts around the world, where magnetic confinement devices such as the stellarator and the tokamak are the topics of the main research. In Costa Rica, there is one of six stellarator devices in the world, the Stellarator of Costa Rica 1 or SCR-1.

The research in nuclear fusion is parallel to the investigation of plasmas and, in plasma investigation, there are multiple devices to characterize it. One of the devices is the Langmuir probe, which serves to measure the density, potential, and temperature of the plasma by introducing metallic electrodes into the plasma.

The probe usually has a positioning system, since the measurements of the probe are local and in fusion devices, measurements are made along the edge of the plasma. The fusion plasmas reach temperatures of millions of degrees Celsius and to avoid the destruction of the electrodes immersed in the plasma, the insertion time is reduced by high-speed movements.

The SCR-1 has a Langmuir probe and a manual positioning of it, which implies that the probe is static during the discharge of the plasma and to make measurements along the edge, multiple discharges are necessary; these involve several hours of work and also non-constant results.

The purpose of this report is to show the design of an automatic positioning system for high-speed travel. The design consists of the entire positioning system of the probe, which includes the vacuum components, the axial movement, and the automatic control thereof.

The positioning system complies with the requirements stated by the researchers of the Plasma Laboratory for Nuclear Fusion and Applications of the ITCR, where the SCR-1 is located. This system reaches speeds of up to $3.5m/s^2$ and offers the advantage, over other similar devices, that a single actuator is used for different movements.

Keywords: fusion, probe, Langmuir, positioning, vacuum, servomotor

Índice general

Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
1 Introducción	1
1.1 Estructura del documento y objetivos del proyecto	2
1.1.1 Objetivos	2
2 Energía nuclear	5
2.1 Dispositivos de confinamiento magnético	6
2.1.1 Tokamak	6
2.1.2 Stellarator	7
3 Marco teórico	11
3.1 Sonda de Langmuir	11
3.2 Sonda de Langmuir recíprocante	12
3.2.1 Sistema de posicionamiento para FRPS	13
3.3 Ejemplos de FRPS implementados en dispositivos de fusión	17
3.3.1 Stellarator TJ-II	17
3.3.2 Tokamak EAST	17
3.4 Servomotores de imán permanente	19
3.4.1 Modelo matemático	20
3.4.2 Control por modulación por ancho de pulso o PWM	22
4 Sistema de posicionamiento para sonda de Langmuir en SCR-1	23
4.1 Diseño y selección de componentes para movimiento axial en vacío	25
4.1.1 Componentes para alto vacío	25
4.1.2 Movimiento de alta velocidad	28
4.2 Sistema de Control	31
5 Resultados y análisis	35
6 Conclusiones	41
7 Recomendaciones	43

Bibliografía	45
A	47
A.1 Apendice I: Planos del sistema	47

Índice de figuras

2.1	Configuración de Tokamak para confinamiento magnético de plasma. . . .	7
2.2	Stellarator de Costa Rica 1 (SCR-1). Fuente [2].	9
3.1	Sistema de posicionamiento actual de la sonda de Langmuir en el SCR-1. Fuente: [7].	12
3.2	Tabla comparativa de actuadores lineales. Fuente: [5].	16
3.3	Sonda de Langmuir reciprocante del stellarator TJ-II. Fuente: [8].	18
3.4	Sonda de Langmuir reciprocante del tokamak EAST. Fuente: [12].	18
3.5	Esquemático simplificado de un servomotor con circuito inversor. Fuente: [1].	19
3.6	Corriente y fuerza contraelectromotriz ideales en un servomotor de tres fases. Fuente: [1].	20
3.7	Circuito equivalente de un servomotor de imán permanente. Fuente: [6]. .	21
4.1	Ángulo poloidal ϑ , ángulo toroidal φ y radio r de la cámara de vacío del SCR-1	23
4.2	Componentes expuestos al alto vacío en el sistema de posicionamiento de la sonda de Langmuir	26
4.3	Diagrama de componentes encargados del movimiento a alta velocidad . .	29
4.4	Simulación de servomotor con inversor en Matlab/Simulink.	32
4.5	Simulación de control de servomotor en Matlab/Simulink.	33
4.6	Esquemático del diseño de la implementación del control de un servomotor.	33
5.1	Posición y error de la sonda de Langmuir en función del tiempo para movimientos rápidos.	35
5.2	Velocidad y error de la sonda de Langmuir en función del tiempo para movimientos rápidos.	36
5.3	Posición y error de la sonda de Langmuir en función del tiempo para movimientos lentos.	37
5.4	Velocidad y error de la sonda de Langmuir en función del tiempo para movimientos lentos.	38

Índice de tablas

2.1	Especificaciones del SCR-1	8
3.1	Secuencia de conmutación del circuito inversor para un servomotor de tres fases. Fuente: [1].	20
4.1	Especificaciones del servomotor EMMS-AS-70	32

Capítulo 1

Introducción

La búsqueda de energías alternativas por parte de la comunidad científica en el mundo ha contribuido a que, desde los años 1950, se investigue la fusión nuclear (la energía casi inagotable de las estrellas) como futura fuente energética mundial.

Las ventajas que la fusión nuclear ofrece sobre otras formas de energía son la universalidad, que es segura y amigable con el ambiente, es casi inagotable y es de escala industrial. Distintos dispositivos han sido diseñados y construidos para la investigación del plasma en fusión nuclear, siendo los principales el confinamiento inercial y el confinamiento magnético. Los dispositivos Stellarator y Tokamak son las principales líneas de investigación de este último.

En el año 2008, el Dr. Iván Vargas Blanco y un grupo de estudiantes del Instituto Tecnológico de Costa Rica, empezaron el camino en la investigación de fusión nuclear con el diseño y construcción de un stellarator modular para el estudio de los plasmas de fusión. En el año 2016, se dio la primer descarga de plasma en el dispositivo, colocando a Costa Rica en uno de los seis países en el mundo en contar con un dispositivo de este tipo.

Actualmente el laboratorio cuenta con el dispositivo stellarator SCR-1 y tokamak MEDUSA-CR para la investigación en fusión nuclear y en estos términos se dedica a la formación de recurso humano, colaboración internacional e identificar problemas relacionados al diseño y construcción de dispositivos pequeños de confinamiento del plasma.

Para realizar estudios del plasma en los dispositivos SCR-1 y MEDUSA-CR, el laboratorio cuenta con distintos métodos para encontrar parámetros relacionados con el comportamiento del plasma, como lo son la densidad, el potencial eléctrico y temperatura. Uno de los métodos clásicos de investigación en plasmas es la sonda de Langmuir, con la cual se logran medir las características antes mencionadas.

La sonda de Langmuir que se encuentra en el laboratorio cuenta con un sistema de posicionamiento manual, el cual provoca que las mediciones realizadas radialmente en el plasma sean lentas y en distintas descargas. Lo anterior provoca que exista una ineficiencia en la

adquisición de datos. Por esta razón, el laboratorio tiene la necesidad de crear un sistema automatizado de posicionamiento de la sonda dentro de la cámara de confinamiento del plasma del stellarator SCR-1.

El proyecto se centra en el diseño de este sistema de posicionamiento, el cual consiste en un actuador lineal accionado por un servomotor, al cual se sujetan las puntas de la sonda. El SCR-1 y todos los dispositivos de fusión funcionan en vacío, por lo que el sistema cuenta con componentes para vacío acoplados al eje lineal. Además, el diseño del soporte y el control automático del motor son diseñados igualmente.

1.1 Estructura del documento y objetivos del proyecto

Este informe corresponde al diseño del dispositivo del sistema de posicionamiento para la sonda de Langmuir. Este está organizado en siete capítulos: el primero introduce el tema de la investigación en fusión nuclear, la necesidad existente por parte del Laboratorio de Plasmas en Fusión Nuclear y Aplicaciones del ITCR por una sonda de Langmuir automatizada y; además, se presentan los objetivos del proyecto en cuestión.

El segundo capítulo explica más a fondo la fusión nuclear y los distintos dispositivos creados para lograr fusión controlada. El tercer capítulo se encarga de explicar la teoría detrás del diseño seleccionado para el sistema de posicionamiento, en donde se describen las sondas de Langmuir, tecnología de vacío, dispositivos de alta velocidad y control automático de los servomotores.

El cuarto capítulo se centra en el diseño del sistema de posicionamiento, en donde se explica la escogencia de componentes y materiales, además de cómo funciona el movimiento y el control del sistema. Los resultados y análisis del diseño se encuentran en el capítulo cinco, las conclusiones en el sexto y algunas recomendaciones en el último capítulo.

1.1.1 Objetivos

Diseñar un sistema de posicionamiento para la sonda de Langmuir del Stellarator de Costa Rica - 1 que presente dos movimientos: uno lento que coloque las puntas en el punto inicial de medición, y otro rápido que desplace la sonda por el área transversal del plasma, en el tiempo de duración de la descarga del mismo.

1. Diseñar el sistema de acción rápida para el posicionamiento de las puntas de la sonda, que tendrá una velocidad mayor o igual 1.5m/s y un desplazamiento variable.
2. Diseñar el mecanismo para el movimiento lento de posicionamiento inicial de la sonda de Langmuir.

-
3. Diseñar el control automático para el mecanismo de los dos movimientos.
 4. Verificar el funcionamiento correcto del sistema mediante simulaciones que se ajusten a las condiciones de operación del mismo.

Capítulo 2

Energía nuclear

La energía nuclear ha sido investigada y utilizada mundialmente, al punto en que existen más de 500 centrales nucleares [7] para la producción de electricidad en el mundo. El principio en el que se basa la obtención de esta energía es por la ecuación de Einstein que indica que la masa se puede transformar en energía y viceversa.

En procesos nucleares, las reacciones que se llevan a cabo implican una disminución de masa en los productos de la reacción. Esta diferencia de masa se traduce en energía mediante la ecuación de Einstein $E = mc^2$, la cual es aprovechada para la producción de electricidad.

Existen dos tipos de reacción nuclear que se pueden llevar a cabo: la fisión y la fusión nuclear. La fisión o separación de núcleos pesados es la utilizada comercialmente para la obtención de electricidad; no obstante, es fuertemente cuestionada por la contaminación radiactiva y los riesgos al ambiente en donde se desarrolla.

Después de 60 años de investigación, la fusión es el otro proceso nuclear que está tomando fuerza para la producción de electricidad. Esta reacción es la encargada de mantener con vida a todas las estrellas del Universo y, contrario a la fisión, une átomos livianos en otros más pesados liberando energía.

Los investigadores en este campo han logrado realizar fusión nuclear en el planeta y la misma promete revolucionar la generación de electricidad por sus múltiples ventajas sobre otras formas de energía alternativa, como su contraparte la fisión. Una de las ventajas más importantes es que con la fusión, se libera cuatro veces más energía que la fisión [9] y es amigable con el ambiente, ya que no se producen residuos perjudiciales.

La investigación en fusión nuclear se ha llevado a cabo junto con la investigación en plasmas, dado que para lograr las reacciones de fusión el combustible (la familia del hidrógeno en su mayoría) debe estar en forma de plasma, por las altísimas temperaturas que se tienen que alcanzar. Uno de los motivos por los cuales la fusión no está tan desarrollada como la fisión es porque el control de las reacciones es más complejo: especialmente la temperatura requerida que es entre 100 y 200 millones Kelvin [9].

A lo largo de los años se han diseñado distintos dispositivos que confinen el plasma a estas temperaturas. Existen dos líneas de investigación para el confinamiento de los plasmas: la inercial y la magnética [11]. Los ingenieros encargados de diseñar y fabricar estos dispositivos han tenido que llevar a cabo investigaciones en tecnología de vacío, plasma, ondas, entre otros.

La línea principal en investigación de fusión nuclear a nivel mundial es el confinamiento magnético, por esta razón se presenta una breve explicación de su funcionamiento y los principales dispositivos que se encuentran en esta línea.

2.1 Dispositivos de confinamiento magnético

Estos dispositivos basan su funcionamiento en la fuerza de Lorentz, esto significa que las partículas cargadas del plasma se desplazan en orbitas helicodales alrededor de las líneas de campo magnético. En el plasma suceden otros fenómenos como las colisiones o derivas, las cuales son explicadas de mejor manera en [11].

La investigación en plasmas ha llevado a los científicos a diseñar máquinas toroidales de vacío para el confinamiento. Estos aparatos utilizan bobinas para generar campos magnéticos helicoidales que logren atrapar el plasma para eliminar el contacto con las paredes de la cámara y evitar las altas temperaturas en las mismas. Existen dos instrumentos toroidales: el Stellarator y el Tokamak, sin ser los únicos dispositivos de confinamiento, sí son la principal línea de investigación para futuros reactores de fusión.

2.1.1 Tokamak

El tokamak fue establecido por científicos rusos en 1952 [7] y se caracteriza por hacer pasar una corriente por el plasma para generar un campo magnético poloidal.

Para lograr un buen confinamiento de partículas, es necesario (en un dispositivo toroidal) tener líneas de campo magnético helicoidales. Por esta razón, el tokamak cuenta con bobinas externas alrededor de toda la cámara que generan un campo magnético toroidal. La combinación entre ambos campos genera las hélices alrededor de toda la cámara. Referirse a la figura 2.1.

Estos dispositivos a lo largo de los años se han convertido en los más utilizados por los científicos, dado que son más fáciles de fabricar frente a los stellarators (explicados más adelante). Actualmente se construye el dispositivo de fusión más grande del mundo: ITER y se planea que logre fusión controlada para la generación de energía basado en la tecnología tokamak.

Las investigaciones con este tipo de instrumentos se llevan a cabo para solventar los problemas inherentes al principio de funcionamiento de este aparato el cual es la necesidad que una corriente pase a través del plasma. Esto conlleva a varias desventajas, dentro de

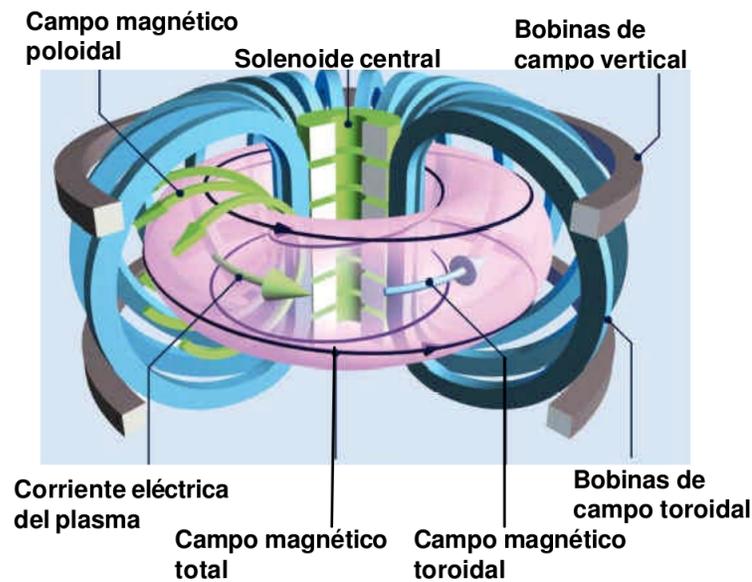


Figura 2.1: Configuración de Tokamak para confinamiento magnético de plasma.

las cuales está el hecho que no puede operar en estado continuo y que la alta corriente que atraviesa el plasma genera inestabilidades (llamadas disrupciones) que provoca graves daños a las paredes de la cámara. [11]

2.1.2 Stellarator

Otro de los dispositivos toroidales para confinamiento magnético son los llamados Stellarators, los cuales se diferencian de los tokamak porque utilizan únicamente bobinas externas para generar el campo magnético helicoidal alrededor de la cámara. Con esta configuración se superan los problemas de disrupciones y el funcionamiento pulsado de los tokamaks [3].

Estos aparatos además de utilizar bobinas más complejas para generar el campo magnético, también necesitan transferir energía al plasma para calentarlo. Los tokamak utilizan el calentamiento óhmico por la corriente que pasa a través del plasma; sin embargo, en los stellarator esto no sucede y se utilizan otros métodos de calentamiento.

Los métodos más utilizados para el calentamiento del plasma son por resonancia ciclotrónica electrónica (ECRH, por sus siglas en inglés), por resonancia ciclotrónica iónica (ICRH) y por inyección de haces de neutros (NBI) [7].

Los stellarator están por debajo de los tokamak en cuestión de resultados para lograr la fusión controlada, dado que históricamente estos últimos han dado resultados favorables en cuestiones de tiempo de confinamiento, temperatura y densidad de los plasmas. Por esta razón, el estudio de Stellarator se ha reducido a 6 países en el mundo, en el cual Costa Rica se integró en el 2016 con la construcción del Stellarator Costa Rica 1.

Stellarator de Costa Rica 1

El dispositivo diseñado y construido por el equipo del Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones, llamado Stellarator de Costa Rica 1 (SCR-1), es un stellarator modular basado en los resultados y características del UST-1 en España [7].

Este dispositivo ha sido desarrollado para "la investigación en plasmas de alta temperatura y baja densidad. A la fecha muy poca investigación ha sido desarrollada en la ingeniería y física de dispositivos tipo stellarator modular a pequeña escala, por lo que el desarrollo tecnológico de este proyecto aportará conocimiento e innovación en el área de stellarators" [2].

El SCR-1 se caracteriza por su pequeño tamaño y bajo costo; además, que es el primer stellarator en América Latina. En junio del año 2016 se realizó la primer descarga exitosa de plasma en el mecanismo y actualmente se realizan pruebas con los diagnósticos con los que se cuenta: sonda de Langmuir, interferómetro y espectrómetro.

En la tabla 2.1 se muestran las especificaciones del SCR-1, las cuales serán consideradas para el diseño de la sonda de Langmuir recíprocante para este dispositivo. En la figura 2.2 se puede visualizar la construcción final del SCR-1.

Tabla 2.1: Especificaciones del SCR-1

N°	Especificación	Detalle
1	Radio mayor	238 mm
2	Radio interno de la sección transversal	94.4 mm
3	Material de la cámara	Aluminio 6061-T6
4	Bridas CF de acceso superior	6x 3-3/8" 2x 4-5/8"
5	Presión de trabajo	5×10^{-5} Torr
6	Campo magnético	43.8 mT
7	Número de bobinas	12
8	Número de vueltas por bobina	6
9	Corriente eléctrica por vuelta	767.8 A
10	Fuente de alimentación de las bobinas	Banco de baterías de 120 V
11	Potencia nominal de calentamiento	5 kW
12	Frecuencia de calentamiento: primer armónico	2.45 GHz
13	Longitud de pulso de plasma	4 s
14	Temperatura electrónica	13 eV (150 000 °C)
15	Densidad de corte del plasma	$7.45 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$

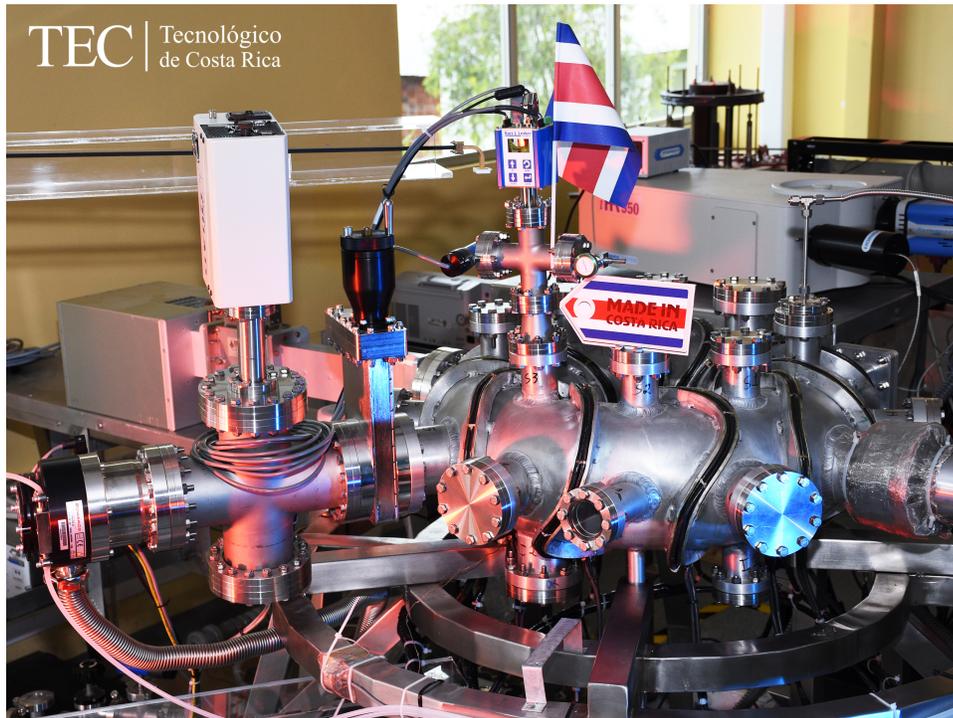


Figura 2.2: Stellarator de Costa Rica 1 (SCR-1). Fuente [2].

Capítulo 3

Marco teórico

3.1 Sonda de Langmuir

Uno de los diagnósticos clásicos para los plasmas es la sonda de Langmuir, inventada en 1924 por el científico Irving Langmuir cuando introdujo el concepto de temperatura electrónica. Con esta sonda es posible realizar mediciones de densidad, potencial eléctrico y temperatura en plasmas.

La sonda se compone de un electrodo o un arreglo de electrodos metálicos que se insertan en el plasma y a los cuales se les aplica un potencial eléctrico cambiante y se realizan mediciones de corriente. Con esto se logra obtener la curva característica de la sonda y de la cual se pueden derivar los distintos parámetros del plasma.

En investigación se utilizan distintas configuraciones de sondas para la medición de distintos parámetros en el plasma. La más sencilla es la sonda unitaria, en la que se cuenta con un único electrodo para realizar las mediciones. Esta configuración se conoce por introducir errores experimentales, por lo que se generalmente se utiliza la sonda doble o triple dependiendo de las características del plasma a analizar.

La sonda de Langmuir se caracteriza por realizar mediciones de los parámetros del plasma localmente, por lo que también se realizan mediciones espaciales del plasma. Esto se realiza con el objetivo de estudiar los bordes del plasma cuyas características sirven para analizar el plasma en todas sus dimensiones y mejorar los dispositivos de confinamiento para fusión nuclear.

En el stellarator de Costa Rica 1 se tiene implementada una sonda de Langmuir, la cual es un arreglo de dos puntas con cuatro electrodos cada una. Esta sonda está hecha de electrodos de tungsteno con recubrimiento cerámico (nitruro de boro) como material aislante.

El sistema de posicionamiento de esta sonda permite introducir las puntas de la sonda a lo largo de todo el radio transversal de la cámara y el plasma. Este sistema es manual, con el movimiento de una perilla y la mediciones de posición hechas con una regla graduada. La

figura 3.1 muestra el diseño actual del sistema, con la excepción del sistema de rotación que no está implementado.

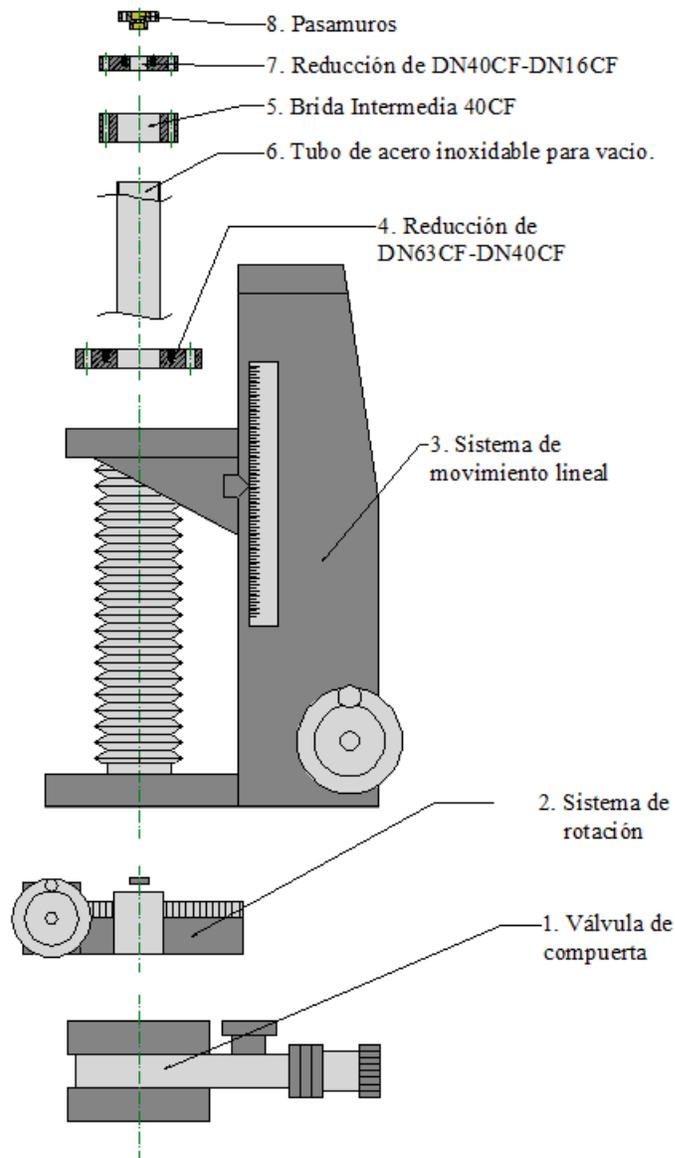


Figura 3.1: Sistema de posicionamiento actual de la sonda de Langmuir en el SCR-1. Fuente: [7].

3.2 Sonda de Langmuir reciprocante

Es importante recordar que los plasmas de fusión deben alcanzar temperaturas extremas y que por esta razón se confinan las partículas para evitar el contacto con los materiales. La sonda de Langmuir es un dispositivo invasivo; es decir, es necesario introducir el electrodo dentro del plasma. Para evitar la destrucción de la sonda se han creado distintos

mecanismos para introducir y extraer la sonda lo más rápido posible dentro de la cámara. A este tipo de sistema se le denomina sonda reciprocante.

Las sondas reciprocantes utilizan los electrodos convencionales; sin embargo, están acoplados a un sistema de movimiento, generalmente automático, que hace que las puntas de los electrodos entren y salgan del plasma a una alta velocidad cuando se realiza la descarga.

Otra de las razones por las cuales se necesita este tipo de mecanismo es porque se introducen cuerpos extraños en el plasma y los resultados pueden variar por las perturbaciones que lo anterior provoca.

La sonda reciprocante rápida (FRPS por sus siglas en inglés) se utiliza generalmente en los tokamaks, dado que es el dispositivo con mayor desarrollo en el mundo y del cual se encuentra la mayor cantidad de dispositivos; no obstante, es posible utilizarla en stellarators. Varios ejemplos de la aplicación de este tipo de sonda se encuentra en el stellarator TJ-II en España y los tokamak KSTAR de Corea del Sur y el EAST de China.

3.2.1 Sistema de posicionamiento para FRPS

Las sondas reciprocantes hacen uso de un sistema de posicionamiento para lograr el movimiento requerido para el estudio del plasma en dispositivos de fusión. Estos mecanismos generalmente son actuados por cilindros neumáticos, servomotores o motores a pasos.

Unas de las principales características o consideraciones de diseño para estos sistemas es que la cámara del stellarator o tokamak se encuentra a presiones de vacío para evitar impurezas en el plasma. Esto implica que el sistema de movimiento de la sonda debe también tener algún tipo de aislamiento o bien estar dentro de presiones de vacío.

Sistema de vacío para FRPS

El vacío es la ausencia de materia en un espacio determinado; no obstante, el vacío perfecto no existe. En el caso de dispositivos para fusión nuclear se alcanzan presiones de alto a ultra alto vacío (10^{-4} - 10^{-10} Torr). Para alcanzar estas presiones, los dispositivos poseen un sistema de bombas que sacan las moléculas de aire dentro de la cámara.

Los componentes expuestos a vacío deben cumplir una serie de características para un óptimo uso y alcanzar las presiones deseadas. Dentro de estas características se encuentran la limpieza, el pulido de las paredes, soportar cargas de $10335\text{kg}/\text{m}^2$, la desgasificación de los materiales debe ser baja, entre otras [4].

Los materiales más utilizados para sistemas de vacío son los metales, dentro de los cuales el aluminio y el acero inoxidable destacan. No obstante, según [4], este último ofrece mejores condiciones de vacío pero su costo es mayor.

En el sistema de vacío para las sondas reciprocantes se tienen distintos componentes que

de alguna deben ser unidos. Para solucionar esto se tienen las conexiones permanentes o desmontables junto con sellos para vacío. Las conexiones permanentes involucran la soldadura, que siempre debe realizarse del lado expuesto al vacío y cumplir con las características de un pulido con rugosidades menores a 1.2.

En cuanto a conexiones desmontables existen diferentes estándares como el ISO-KF y ConFlat o CF. Las bridas CF son las más utilizadas en aplicaciones de alto vacío junto con sellos metálicos, generalmente de cobre. Esta unión consiste en dos bridas simétricas con un filo de cuchillo endurecido, el cual se inserta en el sello metálico y logra la junta con una tasa de fugas muy baja [4].

Otros dispositivos necesarios para que el sistema de posicionamiento de la sonda sea óptimo es la conexión con el exterior, de lo cual la tecnología de *feedthroughs* para vacío se encarga. En el caso de dispositivos para visualizar lo que sucede dentro de la cámara de vacío, se utilizan vidrios de borosilicato o Kodial que son materiales recomendados para vacío [4].

Otra conexión necesaria con el exterior para la sonda es la eléctrica entre los electrodos y el sistema de adquisición de datos. En este caso, existen pasamuros eléctricos los cuales consisten en pines de un metal conductor aislados eléctricamente por algún tipo de cerámica para vacío (alúmina generalmente).

El sistema de la sonda de Langmuir a veces no se utiliza o se necesita realizar mantenimiento al mismo, sin afectar la cámara de fusión. Por esta razón se utilizan válvulas para vacío para separar distintos espacios. Las válvulas deben ser construidas de materiales con muy bajas tasas de desgasificación, debe también tener una buena conductancia y formar un sello lo suficiente para evitar fugas; además de ser libre de mantenimiento y tener larga vida útil [4]. Las válvulas más utilizadas son las válvulas de compuerta o *gate valves* cuyo sello son elastómeros.

En sistemas de vacío uno de los problemas principales para dispositivos móviles expuestos al vacío es como lograr mover componentes dentro de la cámara sin perjudicar la presión interna. Las válvulas son elementos móviles expuestos al vacío y generalmente uno de los componentes principales para su funcionamiento son los fuelles (*bellows* en inglés).

Los fuelles son dispositivos utilizados en vacío para la transmisión de movimientos entre el exterior y la cámara. Estos mecanismos son varios diafragmas de acero inoxidable que se unen por soldadura en sus extremos y se pueden extender y comprimir en un rango determinado. Existen otro tipo de fuelles; sin embargo, los más utilizados para distancias grandes de movimiento son los soldados. Estos dispositivos entran en la clasificación de pasamuros de movimiento, dentro de los cuales para presiones de alto a ultra vacío son los que mejor se desempeñan y ofrecen un mejor sello [4].

Cuando se diseñan mecanismos con fuelles es importante tener claro que el funcionamiento de estos es similar a un cilindro neumático, que significa que la diferencia de presión entre el exterior y el interior del elemento genera lo que se conoce como empuje de presión, y también que la compresión o extensión del fuelle genera una fuerza similar a la de un

resorte.

Para obtener las fuerzas resultantes anteriormente mencionadas se utilizan dos características de desempeño de los fuelles: la constante de resorte (SR por sus siglas en inglés) y el área media efectiva (MEA). SR se refiere a la resistencia que se opone a la carga axial que se ejerce, para la determinación de este valor se toma en cuenta características como el grosor de la pared, material, diámetros y número de diafragmas. Generalmente este valor es dado por los vendedores y está dado con unidades de fuerza sobre movimiento axial.

El MEA es otro valor dado por los comerciantes y relaciona los cambios en presión con cambios en la fuerza ejercida. Ambas características se basan en estudios empíricos y son aproximaciones lineales de los resultados. Con estas características es posible obtener las fuerzas necesarias para mover el fuelle y también que deben soportar los extremos del mismo. Las ecuaciones 4.1 y 4.2 muestran el cálculo de las fuerzas presentes en el uso de un fuelle [10].

$$F_r = SR * x \quad (3.1)$$

$$F_p = P * MEA \quad (3.2)$$

Donde:

F_r : Fuerza de resorte.

SR : Constante de resorte.

x : Distancia de compresión o extensión.

F_p : Fuerza de empuje por presión.

P : Presión externa.

MEA : Área promedio efectiva.

En el mercado de tecnología de vacío se pueden conseguir los dispositivos anteriormente descritos para implementar la sonda de Langmuir reciprocante y se cumplen con las características necesarias para un correcto funcionamiento.

Sistema de movimiento para FRPS

Otro de los sistemas importantes en las sondas reciprocantes es el movimiento. Los posicionadores de alta velocidad han existido por muchos años y han sido utilizados en el estudio de los efectos de los bordes del plasma en los tokamak, donde la neumática externa es la más común en estos mecanismos.

Los sistemas neumáticos han sido utilizados porque ofrecen ventajas en simplicidad y son confiables; no obstante, siempre necesitan de otro mecanismo más lento que defina la posición inicial para tomar medidas con la sonda. El funcionamiento de este tipo de dispositivos empieza por el movimiento lento (un motor o un cilindro neumático lento) en

el cual se define una posición específica; el movimiento rápido se acciona desde ese punto, con la característica que tiene una carrera definida por el cilindro neumático utilizado, es decir, es un recorrido fijo [12].

Existen posicionadores neumáticos que se basan en un control de presiones en ambas cámaras de un cilindro neumático y se les denomina sistemas servo-neumáticos. Estos mecanismos son adecuados para velocidades de alrededor $5m/s$, aceleraciones de $30m/s^2$ y donde se necesita el movimiento de cargas de hasta $300kg$ [5].

Otro sistema utilizado en las sondas reciprocantes es la electromecánica, utilizando motores para lograr mover la sonda a altas velocidades y en distintas posiciones. Estos sistemas se caracterizan por tener una mayor precisión ($20\mu m$, mayor velocidad ($10m/s$) y aceleración ($50m/s^2$); no obstante tienen un costo monetario mayor [5].

En el uso de un sistema electromecánico se tiene los motores, que pueden ser servomotores o motores a pasos, y también los actuadores lineales que transforman el movimiento rotacional a uno lineal. Los motores a pasos son utilizados en movimientos cortos, con cargas altas y a velocidades bajas; su contraparte, los servomotores ofrecen el control óptimo para aplicaciones donde la repetibilidad y la precisión son necesarias a velocidades altas [5].

En la tecnología de actuadores lineales existen distintos tipos donde se encuentra el accionado por una banda dentada, el tornillo de avance de precisión, el tornillo de bola o un motor lineal. Cada uno de estos ofrece distintas ventajas y desventajas en cuanto a velocidad, aceleración, precisión y costo. En la figura 3.2 se puede visualizar una tabla comparativa entre los distintos tipos de movimientos lineales existentes en el mercado.

Drive → Technology:	Standard pneumatics	Servo pneumatics	Belt drive axis w/ stepper	Belt drive axis w/ servo	Ball screw axis w/ servo	Linear motor axis
Application with: ↓						
High load		✓		✓	✓	
Long stroke	✓		✓	✓		✓
High velocity			✓	✓		✓
High acceleration				✓		✓
High precision					✓	✓
Low noise					✓	✓
High stiffness				✓	✓	✓
Low cost	✓	✓	✓			
Multiple positions		✓	✓	✓	✓	✓

Figura 3.2: Tabla comparativa de actuadores lineales. Fuente: [5].

En las sonda reciprocantes generalmente se utilizan los dispositivos neumáticos estándar para los movimientos rápidos como se mencionó anteriormente y para el movimiento lento, generalmente se utiliza un servomotor con un tornillo de precisión para la transformación

del movimiento. En la siguiente sección se presentan ejemplos de implementación de la sonda de la Langmuir recíproca.

3.3 Ejemplos de FRPS implementados en dispositivos de fusión

3.3.1 Stellarator TJ-II

El stellarator TJ-II ubicado en España posee una sonda recíproca el cual posee un sistema de desplazamiento en vacío, el control remoto del movimiento y sistemas auxiliares. El movimiento consiste en dos tipos: uno lento para colocar los electrodos de la sonda en el punto inicial de medición, y uno rápido para obtener las mediciones radiales deseadas en el plasma [8].

El sistema de vacío de esta sonda posee en general todos los dispositivos necesarios para una sonda de Langmuir funcional mencionados en la sección 3.2.1 y se pueden visualizar en la figura 3.3. El sistema cuenta con una válvula para aislar la cámara y la sonda, puertos de visión para ver las puntas de los electrodos y fuelles para lograr el movimiento en vacío.

El sistema de movimiento lento de la sonda está regido por un motor de corriente directa junto con un tornillo de bolas que mueve un fuelle a 0.5cm/s y cuya posición está dada por un decodificador acoplado al motor. El movimiento rápido está dado por un cilindro neumático a alta presión con una carrera de 10cm que alcanza velocidades máximas de 1.5m/s ; la posición en este caso se mide con un resistor lineal ajustado al sistema [8].

El control de movimiento de la sonda se lleva a cabo con un control lógico programable (PLC por sus siglas en inglés), una pantalla táctil y electrónica de acople entre el PLC y el motor y las válvulas neumáticas. El funcionamiento de este sistema se enfoca primero en el movimiento lento, para posicionar la sonda en el punto inicial de medición. Una vez se realice la descarga del plasma, se envía una señal a las válvulas neumáticas para que extiendan el cilindro (el tiempo que las puntas de la sonda se mantienen dentro del plasma es pregrabado) hasta que de nuevo se envíe la señal de contracción del cilindro [8].

3.3.2 Tokamak EAST

El caso de la sonda recíproca del tokamak chino EAST difiere en su sistema con respecto al del TJ-II puesto que para cada movimiento utiliza un motor, es un sistema electromecánico en su totalidad. La escogencia de este sistema se debe a que los sistemas convencionales basados en neumática no fueron considerados de tener la habilidad de controlar un recorrido dado a velocidades altas, donde los servomotores por otro lado presentan una exactitud y precisión altas. [12]

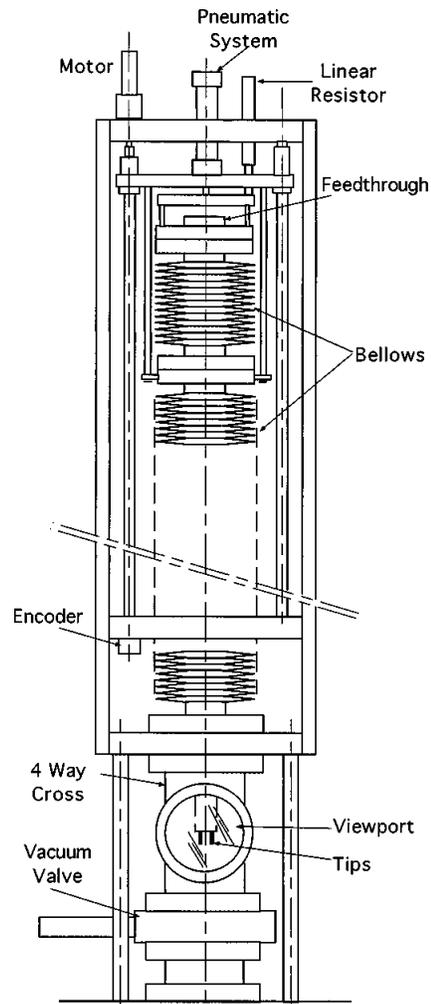


Figura 3.3: Sonda de Langmuir reciprocante del stellarator TJ-II. Fuente: [8].

El sistema de vacío es similar al del TJ-II como se puede apreciar en la figura 3.4. El sistema utiliza una válvula de aislamiento, puertos de visión y fuelles para transmitir el movimiento.

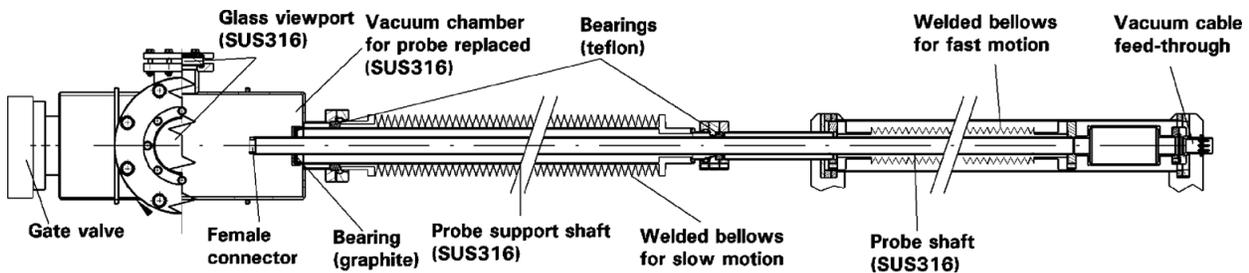


Figura 3.4: Sonda de Langmuir reciprocante del tokamak EAST. Fuente: [12].

El sistema de movimiento también cuenta con uno lento para la posición inicial de medición de la sonda con la diferencia que utiliza un motor a pasos por mover el tornillo de bolas. EL movimiento rápido si se diferencia en gran medida porque se utiliza un sernomotor para mover un cilindro eléctrico de tornillo de bolas con un recorrido de 50cm.

El posicionamiento de la sonda utiliza un potenciómetro de desplazamiento lineal para medir la posición en todo momento durante el accionamiento del sistema. [12]

3.4 Servomotores de imán permanente

Los motores sincrónicos de imán permanente, también llamados motores de corriente directa sin escobillas, utilizan sensores de posición y un circuito inversor que controla la corriente de las bobinas. Se denomina motor sin escobillas porque en lugar de utilizar una conmutación mecánica, un circuito inversor como el que se muestra en la figura 3.5 se encarga de realizar una conmutación electrónica.

Este tipo de motores se caracteriza por que su rotor contiene los imanes y el estator son las bobinas, donde el circuito trifásico es el más común por su eficiencia y bajas oscilaciones del torque. Este tipo de motores utiliza sensores de posición para determinar la ubicación del rotor y con esto realizar la conmutación en el inversor. Los inversores son circuitos compuestos por switches electrónicos tipo MOSFET o IGBT cuya secuencia de encendido y apagado es dependiendo de la ubicación del rotor, dado que cada 60° eléctricos se debe conmutar. [1]. En la figura 3.5 se puede visualizar la conexión simplificada del motor a su correspondiente circuito inversor.

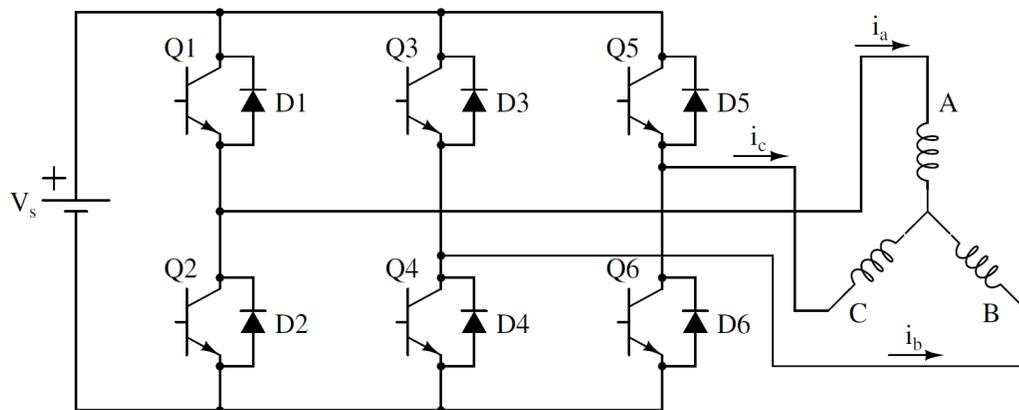


Figura 3.5: Esquemático simplificado de un servomotor con circuito inversor. Fuente: [1].

Existen dos tipos de servomotores principales: trapezoidales y senosoidales. Su división se debe a la forma de la fuerza contraelectromotriz de sus bobinas la cual depende de la forma del rotor y la distribución de la armadura. Los servomotores trapezoidales son los más atractivos por su simplicidad, bajo precio y una mayor eficiencia. En un motor trapezoidal la corriente y la fuerza contraelectromotriz ideales se muestran en la figura 3.6. Para lograr estas formas de onda el circuito inversor debe cumplir con la conmutación correcta de las compuertas, expuestas en la tabla 3.1.

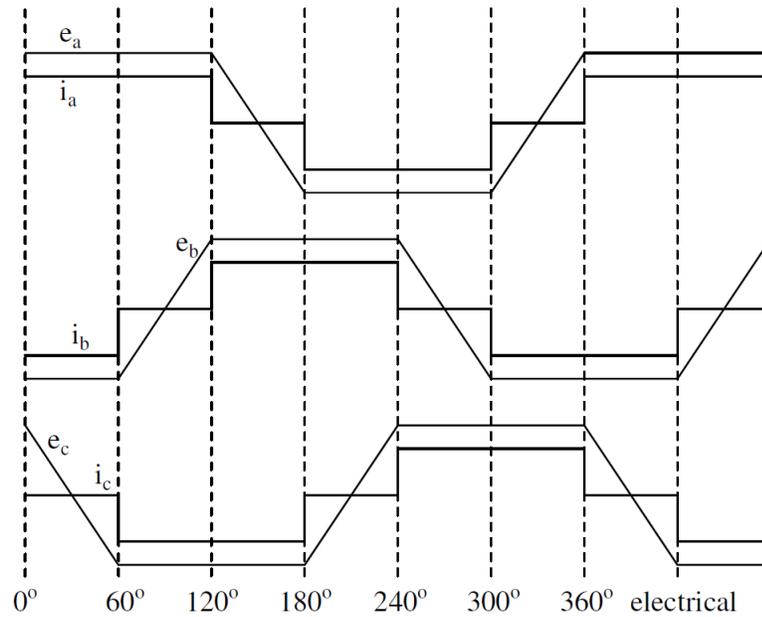


Figura 3.6: Corriente y fuerza contraelectromotriz ideales en un servomotor de tres fases. Fuente: [1].

Tabla 3.1: Secuencia de conmutación del circuito inversor para un servomotor de tres fases. Fuente: [1].

Número	Intervalo de posición	Interruptor cerrado		Corriente de fase		
				A	B	C
0	0° - 60°	Q1	Q4	+	-	off
1	60° - 120°	Q1	Q6	+	off	-
2	120° - 180°	Q3	Q6	off	+	-
3	180° - 240°	Q3	Q2	-	+	off
4	240° - 300°	Q5	Q2	-	off	+
5	300° - 360°	Q5	Q4	off	-	+

3.4.1 Modelo matemático

El modelo matemático de un servomotor sin escobillas se basa en el circuito de la figura 3.7 donde los devanados del estator están en conexión estrella y el rotor es de imán permanente. El modelo asume varias situaciones ideales para simplificarlo (ver [6]).

Las bobinas del estator se puede expresar de la siguiente forma:

$$V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (3.3)$$

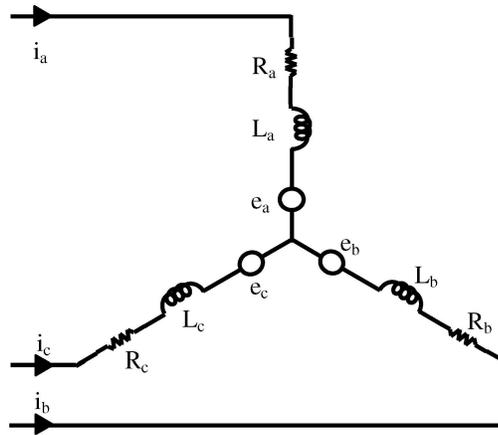


Figura 3.7: Circuito equivalente de un servomotor de imán permanente. Fuente: [6].

$$V_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (3.4)$$

$$V_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (3.5)$$

Estas ecuaciones representan los voltajes de fase (V_a , V_b , V_c) donde R es la resistencia en Ohms por fase, L es la inductancia en Henry, (i_a i_b i_c) son las corrientes de fase y (e_a e_b e_c) son la fuerza contraelectromotriz (back-emf, como se conoce en inglés). Esta fuerza es un voltaje que se genera en oposición al voltaje de fase suministrado y generado por los imanes del rotor. Como se explica en la sección anterior, idealmente estos voltajes son trapezoidales en la mayoría de los servomotores utilizados y se pueden expresar de acuerdo a las siguientes ecuaciones [6]:

$$e_a = k.w.f(\theta) \quad (3.6)$$

$$e_b = k.w.f\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.7)$$

$$e_c = k.w.f\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3.8)$$

La fuerza contraelectromotriz depende de k , la constante de back-emf, de la velocidad w del motor y de la función $f(\theta)$ que se define de la siguiente manera según [1]:

$$f(\theta) = \begin{cases} 1, & 0 < \theta < \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right), & \frac{2\pi}{3} < \theta < \pi \\ -1, & \pi < \theta < \frac{5\pi}{3} \\ -1 + \frac{6}{\pi}\left(\theta - \frac{5\pi}{3}\right), & \frac{5\pi}{3} < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (3.9)$$

El torque generado se puede representar como una suma de lo aportado por cada fase y resulta en la siguiente relación:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{w} \quad (3.10)$$

Además, se tiene la ecuación del torque generado visto desde la parte mecánica como se representa a continuación:

$$T_e - T_L = J \frac{dw}{dt} + Bw \quad (3.11)$$

La ecuación de torque mecánico relaciona el torque de salida T_e con el torque de carga T_L , la velocidad w , la inercia del rotor y el sistema J y la constante de fricción B .

3.4.2 Control por modulación por ancho de pulso o PWM

El control por modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) implica que el motor se encienda y apague a muy alta velocidad. La frecuencia que se utiliza en este tipo de control es fija porque así se simplifica el filtrado del ruido acústico y electromagnético. Las frecuencias utilizadas generalmente son de $20 - 50 kHz$ [1].

Este tipo de control funciona para tres variables en particular del motor: el control de torque mediante la corriente, la velocidad y la posición. De acuerdo a [1], la corriente del motor se controla con un PI (control proporcional e integral) basado en un motor de corriente directa. Las constantes del control están regidas por el valor del tiempo de respuesta esperado t_{re} y la inductancia L y resistencia R de la bobina, de acuerdo a la ecuaciones:

$$\alpha_e = \frac{\ln 9}{t_{re}} \quad (3.12)$$

$$k_p = \alpha_e L \quad (3.13)$$

$$k_i = \alpha_e R \quad (3.14)$$

Para el control de velocidad y de posición también se utiliza un controlador PI y las constantes en el caso de la velocidad son las siguiente:

$$k_p = \alpha_w J \quad (3.15)$$

$$k_i = \alpha_w k \quad (3.16)$$

En este caso, las constantes de velocidad dependen de α_w que a su vez depende del tiempo de respuesta. Baldursson [1] en su tesis asigna a α_w fracciones de α_e donde el valor de una décima resulta satisfactorio para su motor y sus características de funcionamiento esperadas. Para el control de posición, las constantes utilizadas fueron encontradas por el método de prueba y error.

Capítulo 4

Sistema de posicionamiento para sonda de Langmuir en SCR-1

El sistema de posicionamiento de la sonda de Langmuir permite a los investigadores del Laboratorio de Plasmas de Fusión Nuclear y Aplicaciones realizar mediciones de temperatura, densidad y potencial eléctrico en las descargas de plasma. Esto tiene como propósito estudiar los flujos de plasma y energía, lo cual contribuirá en el diseño de máquinas de fusión eficientes, así como el estudio de la física de plasmas.

El diseño del sistema de posicionamiento en el SCR-1 permitirá que el equipo de investigación realice mediciones radiales (a lo largo del radio r) en una misma descarga. El sistema diseñado tendrá un ángulo poloidal ϑ de 90° y un ángulo toroidal φ variable, dependiendo de cuál puerto vertical de la cámara se utilice. Los ángulos se ilustran en la figura 4.1.

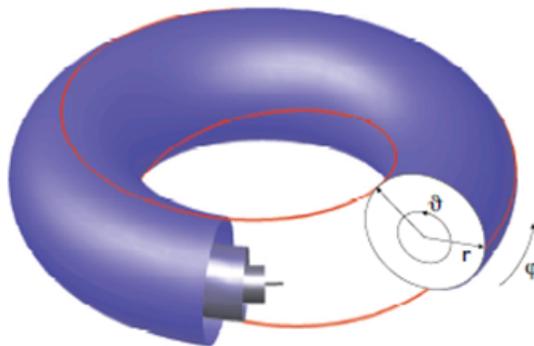


Figura 4.1: Ángulo poloidal ϑ , ángulo toroidal φ y radio r de la cámara de vacío del SCR-1

Esta sección presenta los detalles de diseño del sistema de posicionamiento para la sonda de Langmuir para el SCR-1, donde su funcionamiento se basa en ser una sonda reciprocante. El diseño involucra todos los elementos necesarios para el movimiento de entrada y salida de la sonda en el plasma; cuyos mecanismos comprenden el movimiento lineal a alta velocidad, el aislamiento de vacío y el control del movimiento.

EL movimiento de la sonda de Langmuir debe cumplir con ciertos requerimientos, los cuales se exponen a continuación:

1. La sonda se implementará en la cámara toroidal del SCR-1 con las especificaciones de la Tabla 2.1.
2. Debe existir un sistema de aislamiento de presión entre la cámara de vacío y el sistema de posicionamiento.
3. El sistema de posicionamiento tendrá un puerto de observación para las puntas de la sonda de Langmuir.
4. El sistema debe mover las puntas de la sonda de Langmuir contenidas en un cilindro metálico de 32 mm de diámetro y con un sistema de sujeción por tornillos.
5. La sonda debe tener conexión con el exterior, donde se tiene el sistema de adquisición y procesamiento de datos.
6. El sistema de posicionamiento debe enviar el dato de su posición con una precisión de al menos 0.5 mm, al control del stellarator SCR-1.
7. El sistema de desplazamiento debe tener un movimiento rápido (mayor a 1.5 m/s) por máximo 160mm y otro movimiento que desplazará las puntas de la sonda para su observación a través del puerto de observación.

El diseño del sistema de posicionamiento se realiza considerando lo expresado en el capítulo 3 y los requerimientos antes mencionados. La escogencia por un sistema electro-mecánico frente a uno neumático reside en varias situaciones:

- El laboratorio no cuenta con un sistema de aire comprimido que ofrezca caudales de alrededor de $700l/min$, como una aproximación del sistema del TJ-II.
- La sonda de Langmuir se utiliza en experimentos aislados y el tiempo de operación de la misma se reduce a unos cuantos minutos, por lo que la compra de todo un sistema neumático puede resultar en un gasto innecesario.
- El sistema neumático convencional y utilizado en sondas reciprocantes de otros dispositivos de fusión no permiten el posicionamiento en distintas ubicaciones.
- Existen sistemas neumáticos que permiten el posicionamiento en distintas ubicaciones como se menciona en el capítulo 3; no obstante, la precisión de estos sistemas ronda en valores de $1 - 2mm$, y a veces hasta más altos.

En cuanto al sistema de vacío, es muy similar al utilizado por otros dispositivos similares, y se puede ver en la siguiente sección.

4.1 Diseño y selección de componentes para movimiento axial en vacío

El sistema mecánico diseñado involucra todos los mecanismos necesarios para lograr el movimiento axial vertical de alta velocidad para cumplir con los requerimientos expuestos anteriormente.

El diseño del sistema involucra mover las puntas de la sonda dentro de la cámara, con presiones de alto vacío. Por esta razón, el diseño mecánico se divide en el diseño de la etapa de vacío y el movimiento a alta velocidad.

4.1.1 Componentes para alto vacío

El aislamiento entre la presión ambiente (atmosférica) del laboratorio y dentro de la cámara de vacío del stellarator debe ser soportado por los distintos materiales expuestos a la diferencia de presiones. Los componentes deben cumplir con los requisitos de vacío expresados en el capítulo 3: sección 3.2.1, y todo el sistema satisfacer las funciones escritas en la lista anterior.

El diseño del sistema de vacío y la escogencia de los componentes se puede visualizar en la figura 4.2 y a continuación se explica la función de cada parte. Los componentes utilizados en el diseño (a excepción del fuelle) son de la empresa Kurt J. Lesker, por facilidad de adquisición por parte del laboratorio. El fuelle fue cotizado a una empresa estadounidense especializada en la construcción de fuelles: BellowsTech. Referirse al apéndice A.1 para los planos del sistema.

1. Válvula de aislamiento

Este componente se ubica entre la cámara de vacío y el sistema de posicionamiento, lo cual permite que se aisle la presión de los sistemas para lograr una manipulación de uno sin afectar al otro. Esto posibilita que el mantenimiento de las puntas de la sonda se pueda realizar, sin afectar el sellado de la cámara. Además, el vacío se puede realizar de una manera más eficiente, en caso de que la sonda no se vaya a utilizar para realizar mediciones.

La válvula utilizado para cumplir con esta funcionalidad es una válvula de compuerta manual con bridas ConFlat (CF). Como el funcionamiento de la válvula es de aislamiento, el punto de contacto entre la cámara de vacío del stellarator y la sonda es este componente; por lo tanto, se escoge una válvula que se ajuste a los puertos de entrada del stellarator, en este caso 3 – 3/8 pulgadas.

Además, la válvula escogida es construida con acero inoxidable electropulido y un sello de fluorocarbono con rangos de operación de presión de 1×10^{-9} a 760 Torr, ajustándose a los valores de presión de trabajo del SCR-1 (ver tabla 2.1). Otras

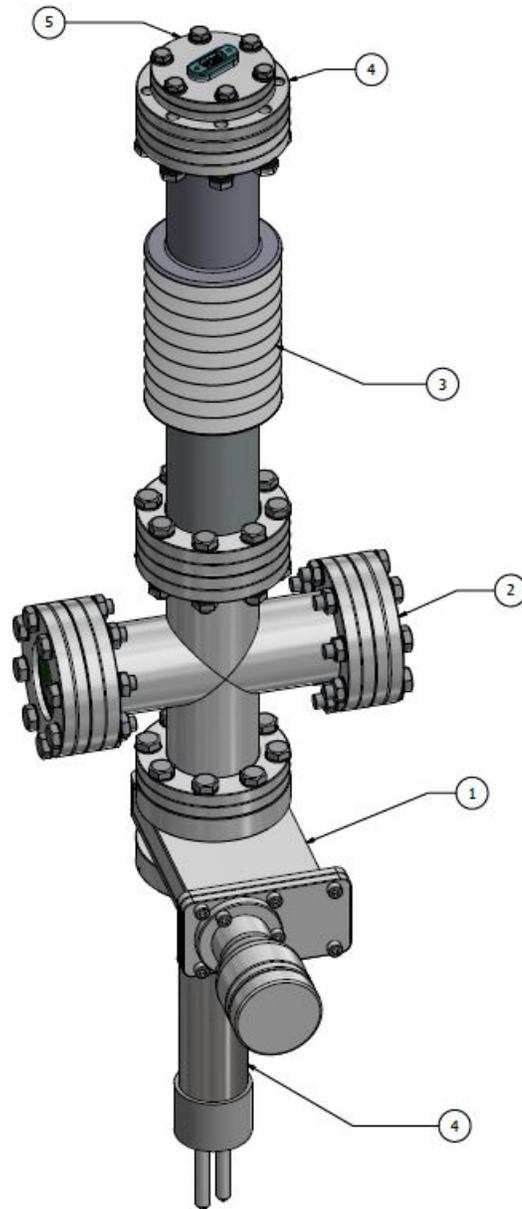


Figura 4.2: Componentes expuestos al alto vacío en el sistema de posicionamiento de la sonda de Langmuir

ventajas que ofrece esta válvula son que ofrece una alta conductancia, mantenimiento después de 100 000 ciclos y el mantenimiento se puede realizar sin tener que desmontar la válvula de todo el sistema.

2. Puertos de visión

Uno de los requerimientos del sistema es que se pueda visualizar el estado de los electrodos sin que se tenga que desarmar el mismo. En vacío, se utilizan los puertos de observación para lograr esto.

El sistema utilizará una cruz con cuatro puertos que se acoplará a la válvula y al

fuelle. Esta cruz también se ajusta al tamaño del sistema con bridas CF de 3 – 3/8 pulgadas y los rangos de presión para la cruz escogida es de alto a ultra alto vacío con materiales de acero inoxidable 304L. Lo cual se ajusta a los parámetros de operación de todo el sistema.

Dos de los puertos están utilizados, en los otros dos puertos se tendrá los puertos de observación: vidrios de borosilicato alcalino completamente templado o Kodial. Este material es apto para ver el proceso dentro de la cámara de vacío, dado que permite con más de 90% transmitir ondas con una frecuencia desde 300 hasta 2000 nanómetros, dejando pasar el espectro de luz visible (380-750nm). Además, los puertos de visión escogidos son compatibles con presiones de ultra alto vacío, sellados con una transición de metal Kovar para soldarlo a una brida CF de tamaño 3 – 3/8 pulgadas de acero inoxidable 304L.

Estas características hacen de los puertos de observación ideales para el funcionamiento requerido; además, que cumplen con las características de vacío del SCR-1 y se ajusta al tamaño de la cruz donde serán conectados.

3. Fuelle

Uno de los sistemas más importantes en el movimiento es el fuelle, dado que permite realizar los movimientos axiales con un actuador externo y mantiene el vacío dentro de la cámara. El actuador comprime y descomprime el fuelle para lograr el movimiento deseado del tubo que se desplaza a través del mismo.

Este fuelle fue cotizado a una empresa estadounidense especializada en fuelles soldados. Las características principales del fuelle es que tiene un diámetro externo de 3 pulgadas y uno interno de 2 pulgadas, el cual es el mismo que en las bridas de 3 – 3/8 pulgadas.

El fuelle tiene una carrera de 20 pulgadas, que se ajusta al movimiento de aproximadamente 16 pulgadas necesario desde la pared inferior de la cámara del SCR-1 hasta el puerto de observación. El factor de seguridad de 4 pulgadas también se puede utilizar para movimientos más largos en caso de modificación o traslado de la sonda a otro sistema.

El sistema está diseñado para presiones de ultra alto vacío, hecho de acero inoxidable. Otras características importantes para el diseño del actuador es que el fuelle tiene una constante de resorte de $1lb/pulg$ y un área media efectiva de $4.9pulg^2$. Además, para la conexión con el sistema, el fuelle está soldado a bridas CF de 3 – 3/8 pulgadas.

4. Tubo guía

Este componente es de acero inoxidable 304L y se encarga de sostener las puntas de la sonda de un extremo mediante tornillos; además de mantener los cables y conectores en una posición segura. El tubo tiene un diámetro externo de 1.5 pulgadas, el cual es el diámetro actual del tubo que sostiene la cabeza de la sonda. Además,

este tubo se desplaza por un agujero de dos pulgadas, que es el diámetro interno de la brida CF de $3 - 3/8$ pulgadas.

En el otro extremo, el tubo está soldado a una brida CF reductora que se acopla a la parte móvil del fuelle. Esto logra que cuando se mueve el fuelle, el tubo se desplace también. Se utiliza una brida reductora para el acople final con el pasamuros (explicado a continuación), donde el tamaño de la brida CF grande es de $3 - 3/8$ pulgadas, con un diámetro de agujero de 1.5 pulgadas para soldar el tubo, y la reducción a una brida CF de $2 - 3/4$ pulgadas.

5. Pasamuros eléctrico

El último componente del sistema de vacío es el que se encarga de realizar la comunicación eléctrica con el exterior, sin perjudicar el vacío dentro de la cámara. Los conectores del interior se conectan a los electrodos de la sonda y los exteriores permiten conectarlo al sistema de adquisición de datos.

La cantidad de pines del pasamuros debe ser como mínimo ocho, dado que la cabeza de la sonda tiene un arreglo de dos puntas con cuatro electrodos cada una. Por esta razón, se elige un pasamuros con nueve pines, y que se acople a la brida CF reductora de $2 - 3/4$ pulgadas.

La conexión del pasamuros es en forma D en ambos lados de vacío y el exterior, con aplicaciones de alto a ultra alto vacío. Los conductores son de Ni-Fe con alúmina como aislante, lo que permite que el sistema sea capaz de transmitir hasta $500V$ con $5A$ de corriente. Estos valores sobrepasan los nominales a los que se utiliza la sonda, por lo que es un elemento óptimo para el sistema de vacío y la sonda.

4.1.2 Movimiento de alta velocidad

El movimiento reciprocante de la sonda se logra con el acople del sistema de vacío anterior con un actuador de alta velocidad, el cual permite mover el fuelle y el tubo interno en un eje vertical.

Los componentes que se utilizan en el sistema de movimiento se ilustran en la figura 4.3 y cada uno de sus componentes son explicados a continuación.

1. Actuador lineal

Uno de las características principales que debe cumplir el actuador lineal es el soporte y la movilidad de la carga. En el sistema de la sonda, la carga incluye los componentes móviles del sistema de vacío (pasamuros, tubo guía, brida reductora y cabeza de la sonda) más las fuerzas ejercidas por el fuelle.

El peso de los componentes móviles del sistema de vacío es de aproximadamente $50N$, dado que la masa de todas las partes sumadas es $5kg$. Para el fuelle, de acuerdo a la sección 3.2.1, se calculan dos fuerzas dependientes de las características

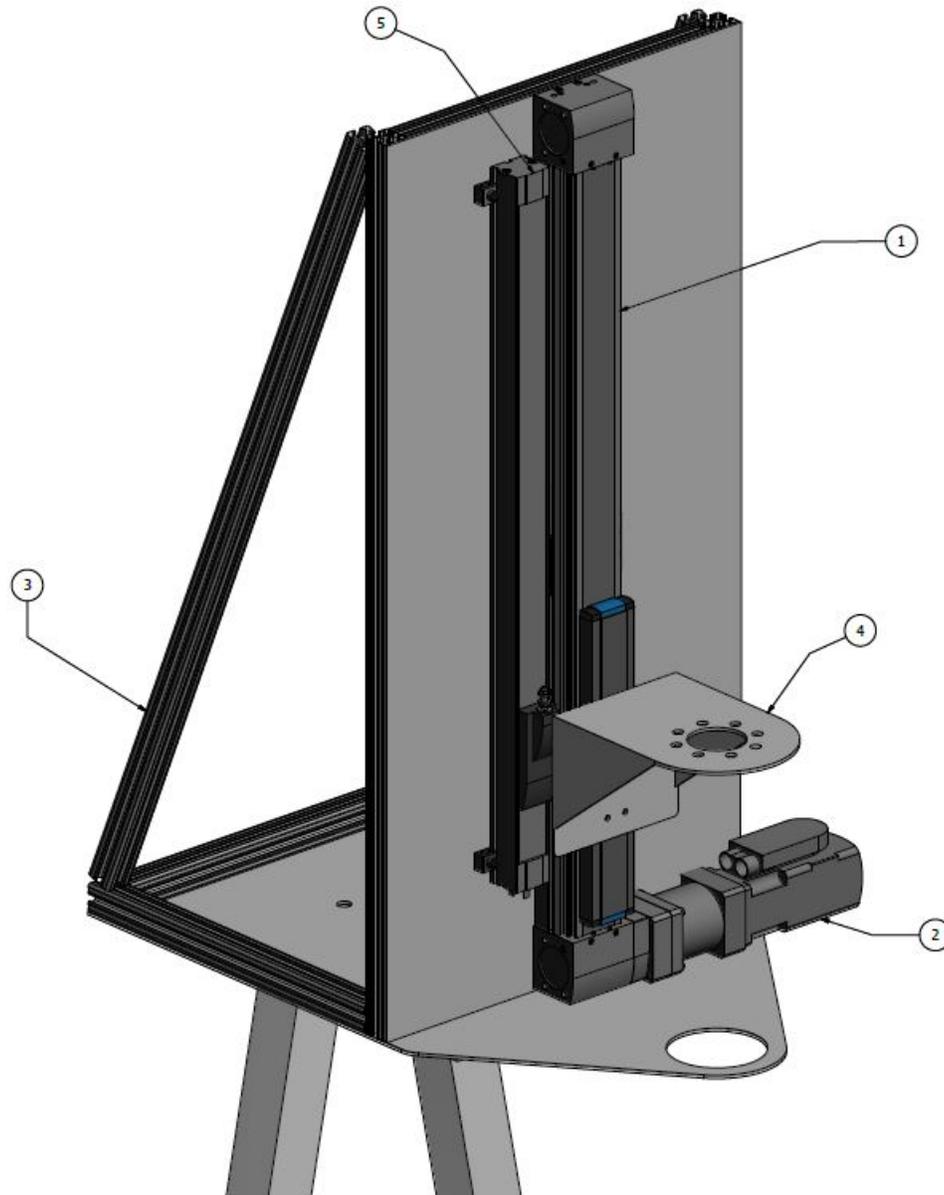


Figura 4.3: Diagrama de componentes encargados del movimiento a alta velocidad

específicas del fuelle: fuerza por la diferencia de presiones y la acción de resorte (ecuaciones 4.2 y 4.1 respectivamente).

El fuelle seleccionado para el sistema de vacío tiene una constante de resorte de $1lb/pulg$ con un área efectiva promedio de $4.9pulg^2$ y la carrera de movimiento es de 20 pulgadas; además, la diferencia de presiones es aproximadamente la presión atmosférica ($14.7psi$). Esto implica que las fuerzas ejercidas por el fuelle sean:

$$F_r = SR * x = 1lb/pulg * 20pulg = 20lb \approx 90N \quad (4.1)$$

$$F_p = P * MEA = 14.7lb/pulg^2 * 4.9pulg^2 = 72lb \approx 320N \quad (4.2)$$

Es importante mencionar que estas fuerzas son ejercidas en momentos diferentes en los soportes del fuelle. Cuando el sistema se encuentra en vacío, la fuerza F_p intenta comprimir el fuelle. En cuanto el sistema se mueve y comprime el fuelle, se ejerce la fuerza F_r que intenta extender el mismo. Lo anterior implica que la fuerza máxima ejercida por el fuelle es de $320N$ y conforme se comprime, la fuerza disminuye idealmente lineal por la constante de resorte. En total, el actuador lineal entonces debe soportar una carga máxima de $370N$ de fuerza.

Este componente es el encargado de realizar el desplazamiento (aproximadamente $400mm$) de la sonda, el cual funciona transformando el movimiento rotacional a lineal con el uso de una banda dentada y poleas. Se escoge este tipo de transformación puesto que ofrece mayores velocidades frente a otros, con precisiones mayores y costo medio (sección 3.2.1), lo cual es una ventaja para el sistema que se diseña.

Por facilidad de adquisición en el país y disponibilidad de todos los componentes necesarios para su funcionamiento, se utiliza un eje de banda dentada marca Festo (ELGA-TB-RF). Este actuador lineal está capacitado para velocidades de hasta $10m/s$, con aceleraciones de $50m/s^2$ y una exactitud de $\pm 0.08mm$. Dentro de este tipo se ofrecen tres tamaños, que varía dependiendo de la carga; se escoge el tamaño 80, que soporta una carga máxima de $800N$ y por lo tanto puede con la carga máxima del sistema estimada anteriormente.

Este dispositivo se acopla al motor que hace girar las poleas dentadas que mueven un carro conectado a la banda por una guía de rodamientos. La carrera total del actuador es de $400mm$, para cumplir con el desplazamiento deseado. La relación de transformación es de $125mm/rev$. El carro está conectado mediante un soporte a la cabeza móvil del fuelle, lo cual permite que todo se mueva junto.

2. Motor, reductor y acople.

El sistema encargado del movimiento automático de la sonda es el motor, en el cual se utilizará un motor recomendado por el fabricante del actuador lineal. Este dispositivo estará acoplado a un reductor para aumentar el torque, lo que facilitará que el dispositivo se mueva con una mayor aceleración.

El motor a utilizar es Festo (EMMS-AS), el cual es un servomotor sin escobillas de tres fases con un encoder para determinar la posición del mismo. Además, el fabricante ofrece la opción de incluir un freno en el motor. Este dispositivo tiene una potencia de $945W$, un torque nominal de $1.37Nm$ y velocidad nominal de $6600rpm$.

El motor está directamente acoplado a un reductor de velocidad para aumentar el torque del motor y lograr mover la carga. Este dispositivo es un engranaje planetario con relación 3:1. Para conectar el reductor con el actuador lineal es necesario un ensamble que permita la conexión, para lo cual se utiliza un equipo vendido por el mismo fabricante que realiza el acople de los dispositivos.

3. Soporte

El sistema de movimiento debe tener un soporte rígido que se acople a la base de la sonda de Langmuir existente. El soporte diseñado cuenta con una placa de aluminio de $3mm$ con dimensiones específicas que se ajusta a los parámetros de la base principal de la sonda y el sistema de vacío implementado (referirse al apéndice A.1).

Además, se utiliza la extrusión de aluminio 80/20 para hacer el sistema de soporte del actuador y el sensor de desplazamiento. Este perfil es fácil conseguirlo en la industria, es barato y liviano. Para el soporte del actuador lineal y el sensor se utiliza una lámina de aluminio igual que la base (referirse al apéndice A.1).

4. Sensor de desplazamiento

Un dispositivo opcional es el sensor de desplazamiento que indicaría la posición de la sonda en todo momento. Sin este dispositivo, la medición se realizaría con el encoder presente en el servomotor utilizado junto con la transformación de movimiento necesaria.

No obstante, este dispositivo ofrece la ventaja de que se estaría midiendo la posición de la sonda de forma directa, rápida y con una resolución de $0.01mm$. Con el encoder del motor se llega a una resolución aproximada de $0.2mm$ y se pueden inducir errores en la medición por las distintas no linealidades que el sistema de transformación de movimiento presenta: juegos mecánicos, la expansión de la banda, entre otros.

4.2 Sistema de Control

El sistema de control diseñado se basa en la sección 3.4 donde se tiene el modelo matemático el cual fue implementado con las herramientas que el software MATLAB con SimuLink ofrece, como el modelado de un motor sincrónico de imán permanente y el inversor directamente en un bloque de Simulink. En la figura 4.4 se observa el modelado del motor únicamente y las características del motor a utilizar se encuentran en la tabla 4.1.

El diagrama de control en la figura 4.5 muestra las dos implementaciones de control PI, donde se controla tanto la velocidad como la posición del servomotor.

El control funciona con controles PI, donde la salida del control de velocidad se traduce a un voltaje DC de alimentación de motor. El control por modulación de ancho de pulso (PWM) se encarga de traducir este valor a un ciclo de trabajo necesario para alcanzarlo.

La implementación de este tipo de control para un servomotor de tres fases necesita de componentes esenciales como lo es un microcontrolador para realizar toda la lógica de control, un driver de compuertas que se encarga de elevar las señales de PWM del microcontrolador (bajo voltaje) a uno adecuado para accionar las compuertas y por último el inversor que como se explica en la sección 3.4 es necesario para lograr la conmutación electrónica.

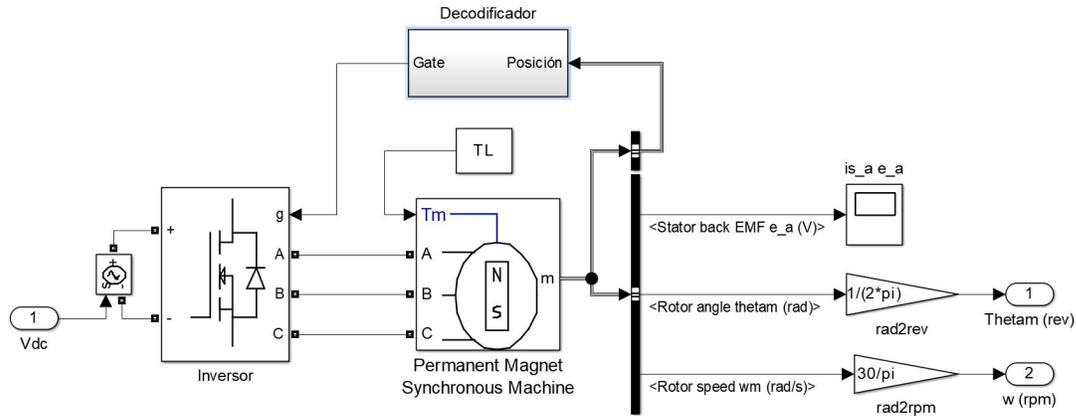


Figura 4.4: Simulación de servomotor con inversor en Matlab/Simulink.

Tabla 4.1: Especificaciones del servomotor EMMS-AS-70

N°	Especificación	Detalle
1	Tensión nominal	360V
2	Corriente nominal	2.64A
3	Potencia	945W
4	Torque nominal	1.37Nm
5	Velocidad nominal	6600rpm
6	Constante del motor	0.518Nm/A
7	Resistencia por fase	4.9 Ω
8	Inductancia por fase	8.45mH
9	Momento de inercia	0.449kgcm ²

Además de estos sistemas, se necesitan otros como la fuente de alimentación para cada una de las partes, el motor cuenta con un freno por lo que se necesita elevar el voltaje de la señal del microcontrolador con un relé. En la figura 4.6 se pueden visualizar las entradas y salidas del sistema de control así como cada una de las partes esenciales para su correcto funcionamiento.

El control tendrá un sistema de emergencia en caso de ocurrir algún inconveniente durante las pruebas, donde el procedimiento de acción es recibir la señal de emergencia y llevar la sonda al punto de seguridad que se encuentra fuera de la cámara de vacío del stellarator.

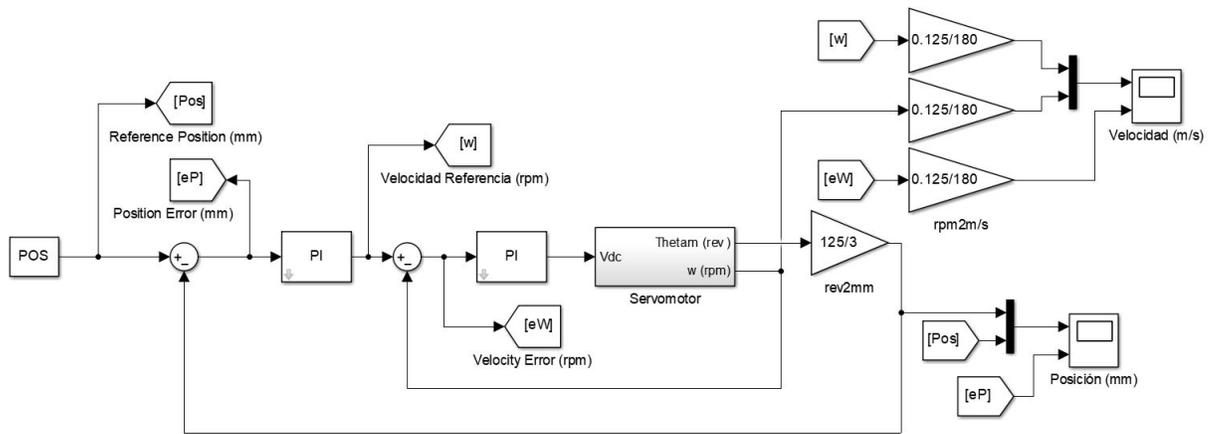


Figura 4.5: Simulación de control de servomotor en Matlab/Simulink.

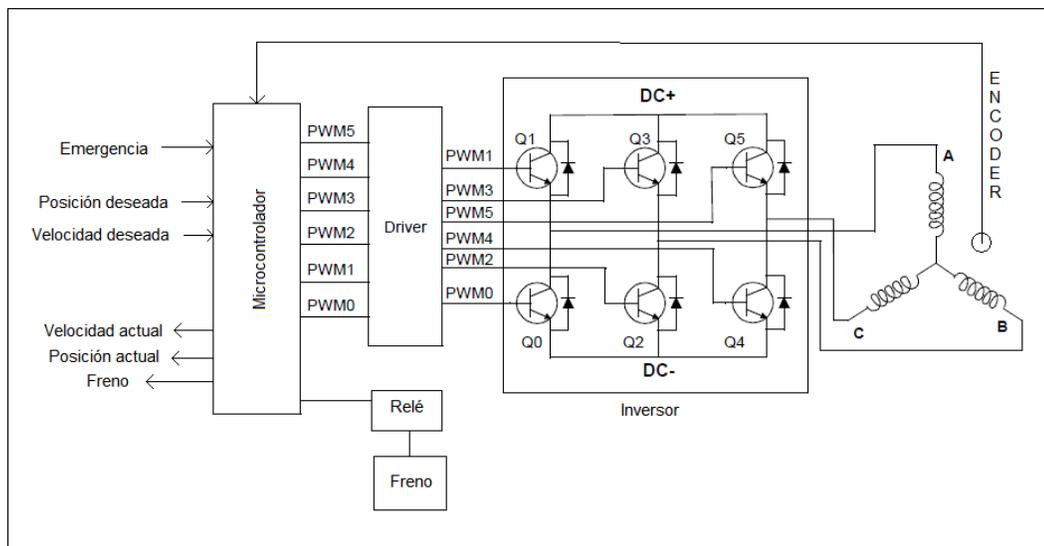


Figura 4.6: Esquemático del diseño de la implementación del control de un servomotor.

Capítulo 5

Resultados y análisis

El control automático diseñado en la sección 4.2 fue simulado en Matlab/Simulink donde mediante el método de prueba y error se llegaron a resultados satisfactorios en cuanto a error de estado estacionario y que no se generan sobre impulsos en la respuesta tanto de la velocidad como de posición.

Dentro de las simulaciones realizadas, para realizar el movimiento rápido es necesario la entrada escalón con el valor de la posición requerido, como se observa en la figura 5.1. Es importante destacar que el objetivo es alcanzado en 0.07s y el error en estado estacionario de este movimiento es de 0.5mm.

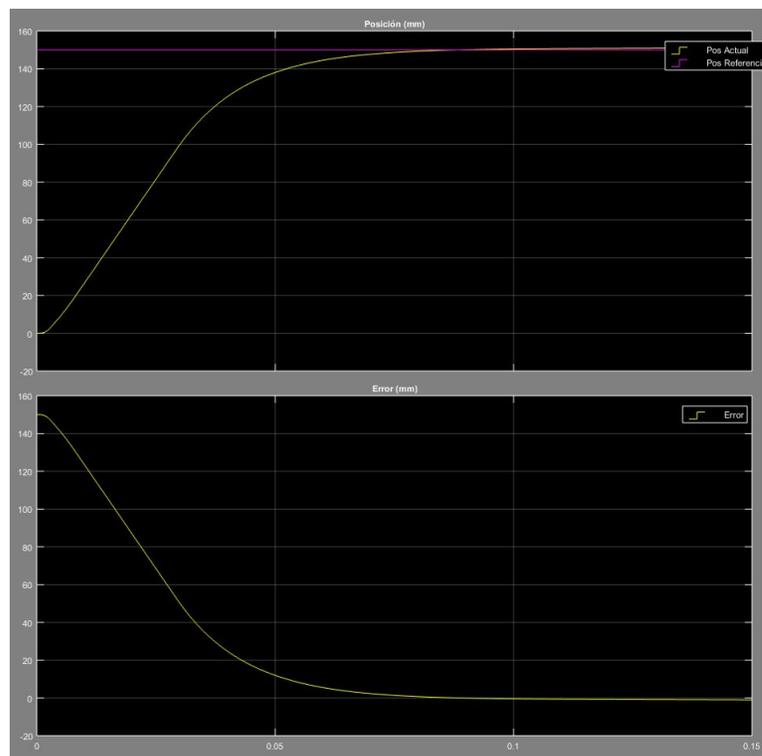


Figura 5.1: Posición y error de la sonda de Langmuir en función del tiempo para movimientos rápidos.

El valor máximo de velocidad alcanzado son 3.6m/s, esto tiene validez dado que la velocidad máxima del motor con la carga establecida son 5300rpm y se utiliza un reductor con relación 3:1 y la relación de transformación entre movimiento rotacional y lineal es 0.125m/rev. Al igual que la posición, la velocidad también se controla y los resultados de la simulación se observan en la figura 5.2.

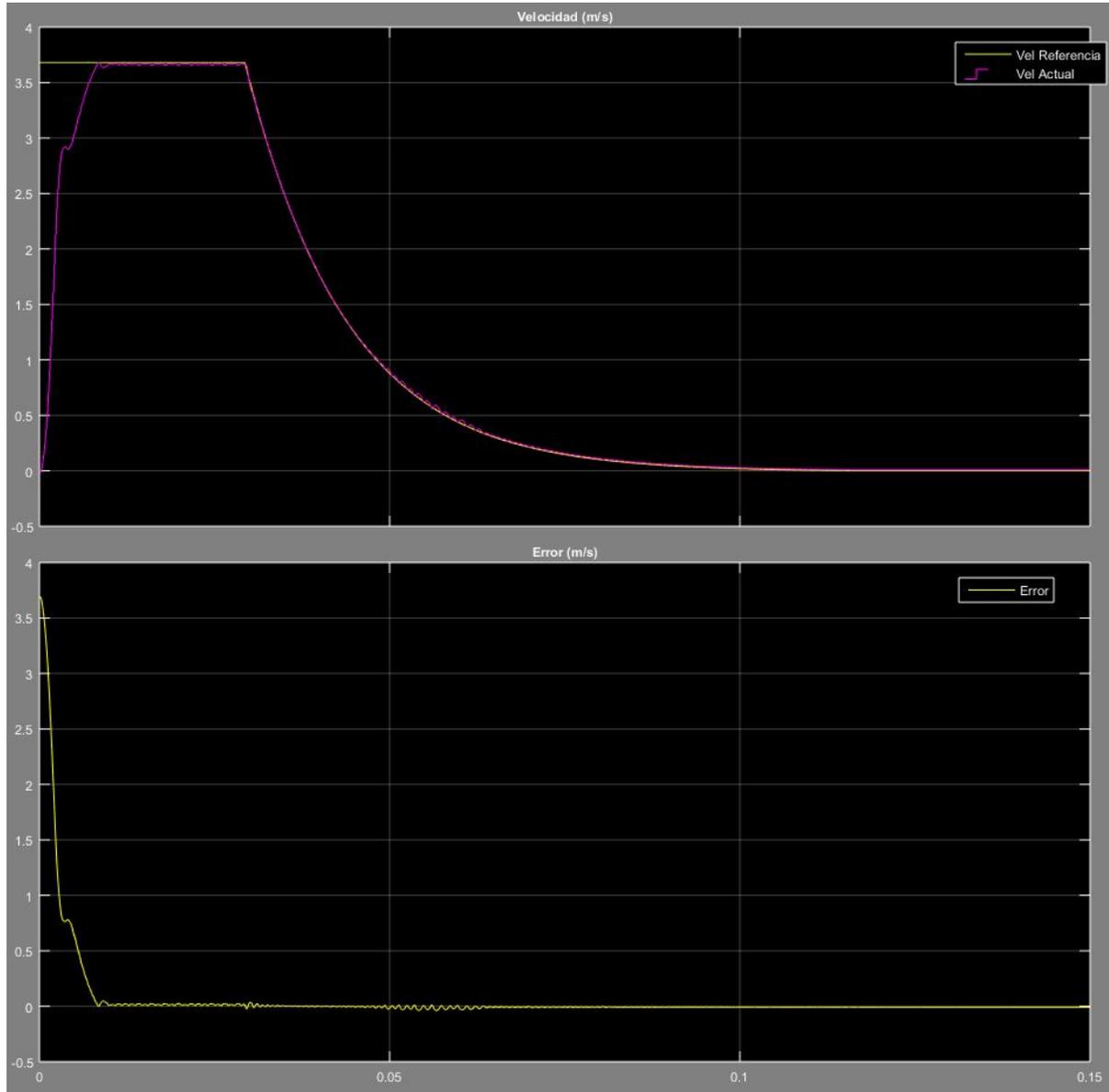


Figura 5.2: Velocidad y error de la sonda de Langmuir en función del tiempo para movimientos rápidos.

Para el caso de movimientos lentos, es necesario generar una rampa de posicionamiento para limitar la velocidad a la que se desplaza el dispositivo. Un ejemplo de este desplazamiento se encuentra en la figura 5.3 donde se tiene una referencia creciente hasta alcanzar el valor máximo deseado, lo anterior se logra asignando una posición final y la velocidad a la que se quiere el movimiento.

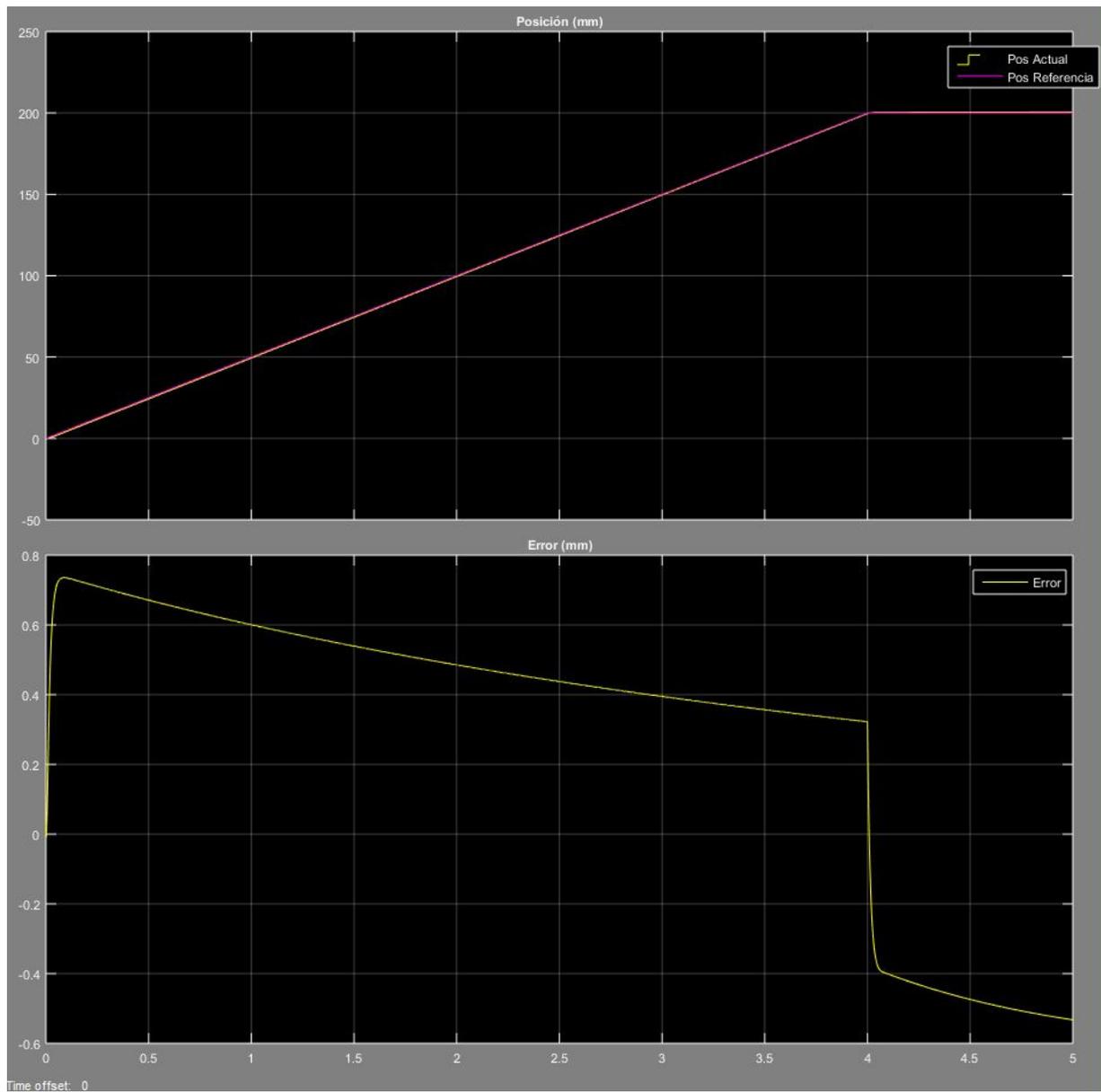


Figura 5.3: Posición y error de la sonda de Langmuir en función del tiempo para movimientos lentos.

En este caso el control logra obtener errores en estado estacionario para la posición menores a 1mm . En cuanto a la velocidad, se presentan resultado más favorables de error en estado estacionario como se muestra en la figura 5.4, donde alcanza valores no mayores a 0.005m/s .

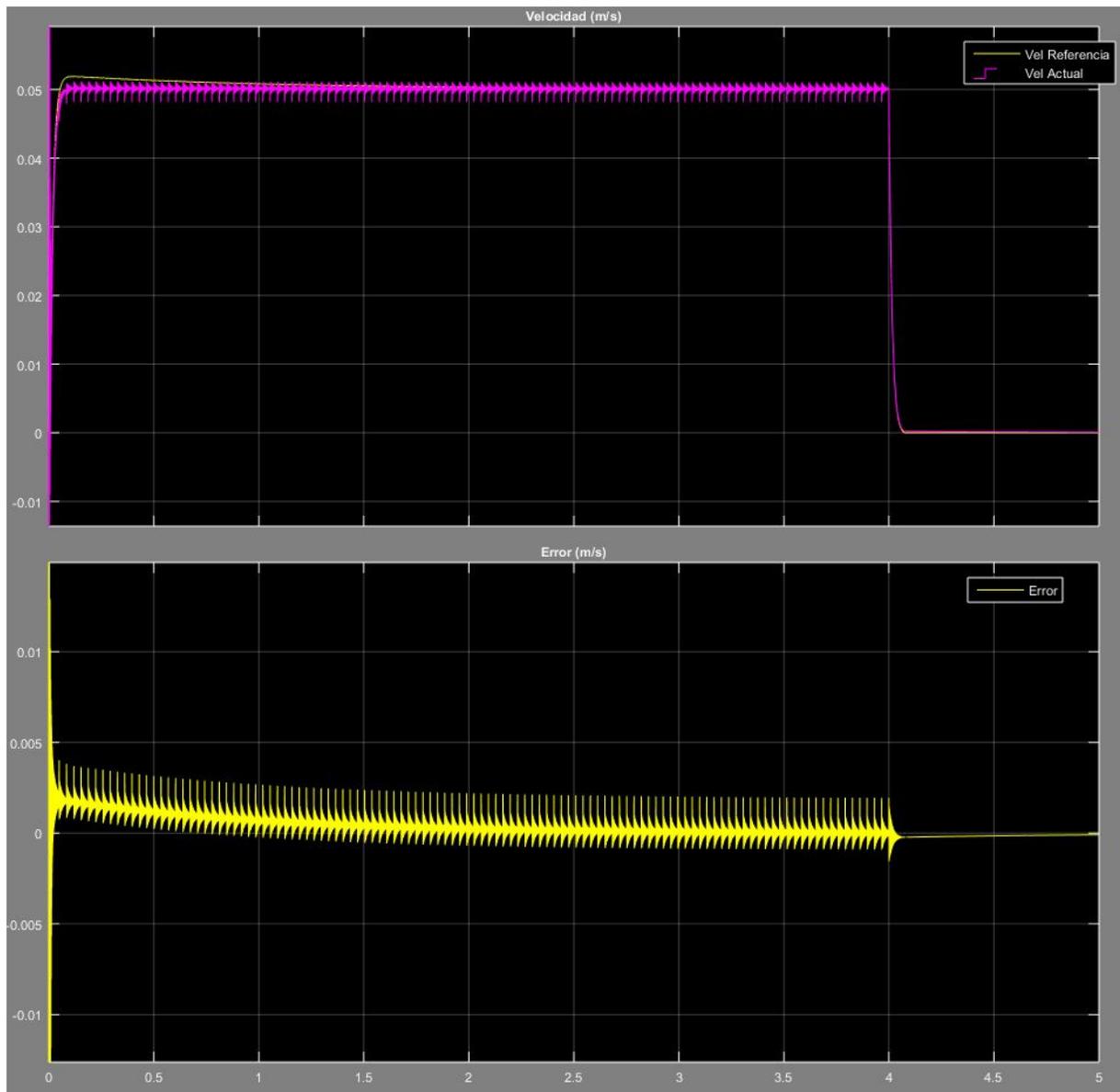


Figura 5.4: Velocidad y error de la sonda de Langmuir en función del tiempo para movimientos lentos.

El sistema de movimiento axial diseñado debe cumplir con los requerimientos expresados al inicio del capítulo 4. Estos requerimientos se verifican según fueron numerados.

1. Implementación de la sonda en el SCR-1:

La sonda está diseñada para ajustarse al puerto de entrada de 3/8 de pulgada, cuyo sistema de vacío y componentes están capacitados para cumplir con presiones de vacío máximas de $10^{-9} Torr$, que se ajusta a los valores de presión de trabajo del stellarator.

2. Existencia de un sistema de aislamiento entre cámaras:

El diseño en vacío utiliza una válvula de compuerta con sellos elastóméricos para separar las presiones entre la cámara del stellarator y el sistema de vacío de la sonda.

3. Existencia de un puerto de observación para las puntas de la sonda:

El sistema de vacío cuenta con una cruz de *viewports* con vidrio de Kodial para la visualización correcta del estado de los electrodos y la cabeza de la sonda.

4. El sistema se ajusta a las dimensiones de la cabeza de la sonda:

La cabeza se encuentra sujeto mediante tornillos a un tubo de vacío que está soldado a una brida de la parte móvil del sistema de vacío.

5. Existencia de conexión de datos entre el interior y el exterior del sistema de vacío:

Las puntas de los electrodos se conectan mediante cables a un pasamuros eléctrico ubicado al final de la parte móvil de la sonda. Es importante destacar que a pesar que el sistema se mueve, los cables en el interior son estacionarios; es decir, no se contraen ni comprimen con el movimiento.

6. Envío de datos de posición con una precisión de 0.5mm:

La precisión del encoder en el servomotor como se mencionó en la sección 4.1.2 es de 0.2mm y si se desea adquirir el sensor de desplazamiento opcional se tendría una precisión de 0.01mm.

7. El sistema cuenta con un movimiento rápido mayor a $1.5m/s$ por $160mm$ y otro lento para el desplazamiento a los puertos de observación.

El sistema presenta resultados favorables en la simulación del control presentada al inicio de este capítulo, donde se pudo observar que es posible alcanzar velocidades de $3.5m/s$ en un posicionamiento de 0 a $150mm$ en menos de 0.07s.

Adicionalmente también se cuenta con el desplazamiento lento, en el cual el usuario elige la velocidad de desplazamiento. Esto sirve para posicionar la sonda en un punto inicial de medición o un punto específico requerido por el experimento a realizar.

Capítulo 6

Conclusiones

A lo largo de esta tesis se obtuvieron resultados de los cuales se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Se diseñó un sistema de vacío móvil que se puede desplazar a velocidades de $3m/s$ sin afectar las presiones de vacío dentro de la cámara del Stellarator de Costa Rica 1.
- El sistema de vacío cuenta con un posicionamiento que logra movimientos rápidos, alcanzando velocidades de hasta $3.5m/s$ y logrando desplazamientos variables a gran velocidad. Esto implica que la sonda puede ser utilizada para realizar inmersiones en el plasma del stellarator a gran velocidad para reducir las perturbaciones causadas por los electrodos y así estudiar el plasma desde una visión radial en la cámara.
- El sistema de posicionamiento a alta velocidad también ofrece la ventaja que se puede utilizar para movimientos lentos donde la velocidad no es crítica en el experimento. Este posicionamiento es más preciso y es posible utilizarlo en el posicionamiento inicial de la sonda, así como en una sonda estática dentro del plasma.
- El control del sistema de posicionamiento se logró diseñar, el cual consiste en el control de posición y velocidad de un servomotor sincrónico de imán permanente que logra mover la sonda a velocidades de $3.5m/s$ y menores, que implican que solo se utiliza un actuador para varios movimientos.

Capítulo 7

Recomendaciones

- La escogencia de componentes para el control del servomotor debe ser capaz de soportar los valores de corriente y tensión necesarios para el mismo. Las simulaciones están basadas en un control PWM, con un circuito inversor con compuertas tipo MOSFET.
- La cabeza de la sonda donde se encuentran los electrodos es desmontable; sin embargo, para cumplir con la tarea de mantenimiento es necesario desarmar el sistema de vacío y extraer todo el tubo guía con las brida reductora y el pasamuros eléctrico. Por esta razón, el diseño de un sistema de electrodos desmontable como un conector facilitaría la acción de mantenimiento de las puntas de la sonda.
- El mantenimiento de las puntas de la sonda, si se tiene una cabeza fácilmente desmontable, se puede realizar sin desarmar todo el sistema de vacío mediante los puertos de observación. La cruz puede tener los puertos de observación de un mayor tamaño de brida CF con el objetivo de que entre la mano y sea posible desmontar los electrodos para mantenimiento o para colocar unos nuevos.

Bibliografía

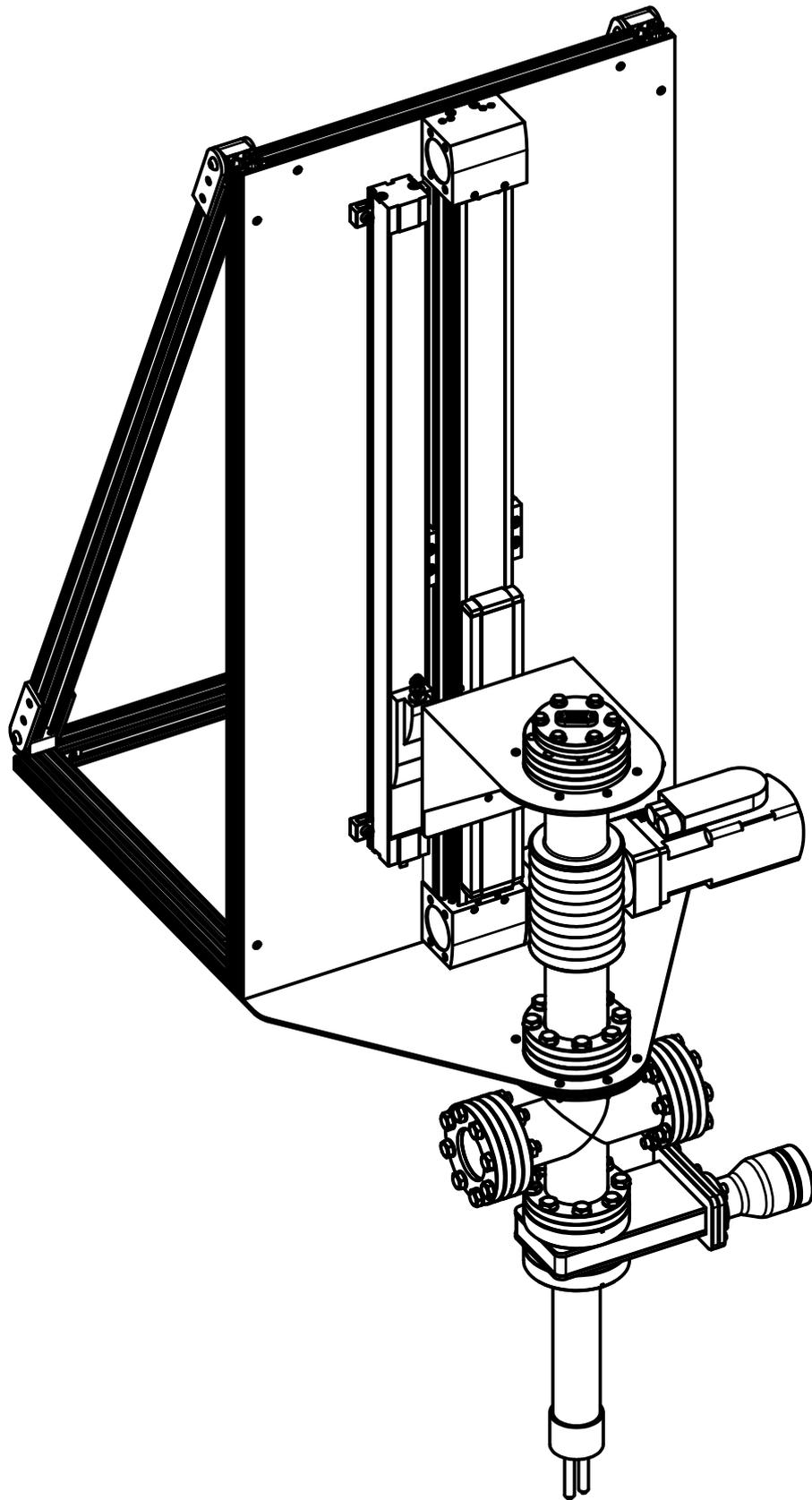
- [1] S. Baldursson. *BLDC Motor Modelling and Control – A Matlab®/Simulink® Implementation*, 2005.
- [2] Grupo de Plasmas y sus aplicaciones. Diseño y construcción de un stellarator modular pequeño para el confinamiento magnético de plasmas. [online, visitado el 10 de noviembre de 2017]. URL <http://plasma.ietec.org/>.
- [3] D.A. Hartmann. Stellarators. *Transaction of Fusion Science and Technology*, 49(2T):43–55, 2006.
- [4] O’Hanlon J. *A user’s guide to vacuum technology*. John Wiley Sons, 3rd edition, 2003.
- [5] F. Langro. Pneumatics vs electrics: A niche for each [online]. 2011 [visitado el 10 de noviembre de 2017]. URL http://www.designworldonline.com/pneumatics-vs-electrics-a-niche-for-each/#_.
- [6] S. Mondal, A. Mitra, and M. Chattopadhyay. Mathematical modeling and simulation of brushless dc motor with ideal back emf for a precision speed control. *2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, 2015.
- [7] J. Morera. *Diseño de una sonda de Langmuir para el stellarator SCR-1*, 2009.
- [8] M. A. Pedrosa, A. López-Sánchez, C. Hidalgo, A. Montoro, A. Gabriel, J. Encabo, J. De La Gama, Martínez L. M., E. Sánchez, R. Pérez, and et al. Fast movable remotely controlled langmuir probe system. *Review of Scientific Instruments*, 70(1):415–418, 1999.
- [9] E. R. Rebhan and G. V. Oost. Thermonuclear burn criteria for d-t plasmas. *Transactions of Fusion Science and Technology*, 49(2T):16–26, 2006.
- [10] Inc. Sigma-Netics. Design with metal bellows. [online]. 2015 [visitado el 10 de noviembre de 2017]. URL http://sigmanetics.com/pdfs/white-papers/SN_WP_MetalBellows.pdf.
- [11] R. Weynants. Fusion machines. *Transactions of Fusion Science and Technology*, 49:36–42, 2006.

- [12] W. Zhang, J. F. Chang, B. N. Wan, G. S. Xu, C. J. Xiao, B. Li, C. S. Xu, N. Yan, L. Wang, S. C. Liu, and et al. Fast reciprocating probe system on the east superconducting tokamak. *Review of Scientific Instruments*, 81(11), 2010.

Apéndice A

A.1 Apéndice I: Planos del sistema

A continuación se encuentran los planos del sistema de posicionamiento de la sonda de Langmuir para el SCR-1.



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
 ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA

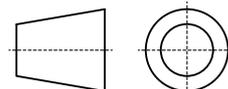
ESCALA:	ACOTACIÓN: mm
DIBUJÓ: A. COTO	FECHA:
DISEÑO: A. COTO	2017-11-16
SUPERVISÓ: J. MORA	

PARTE:

SISTEMA

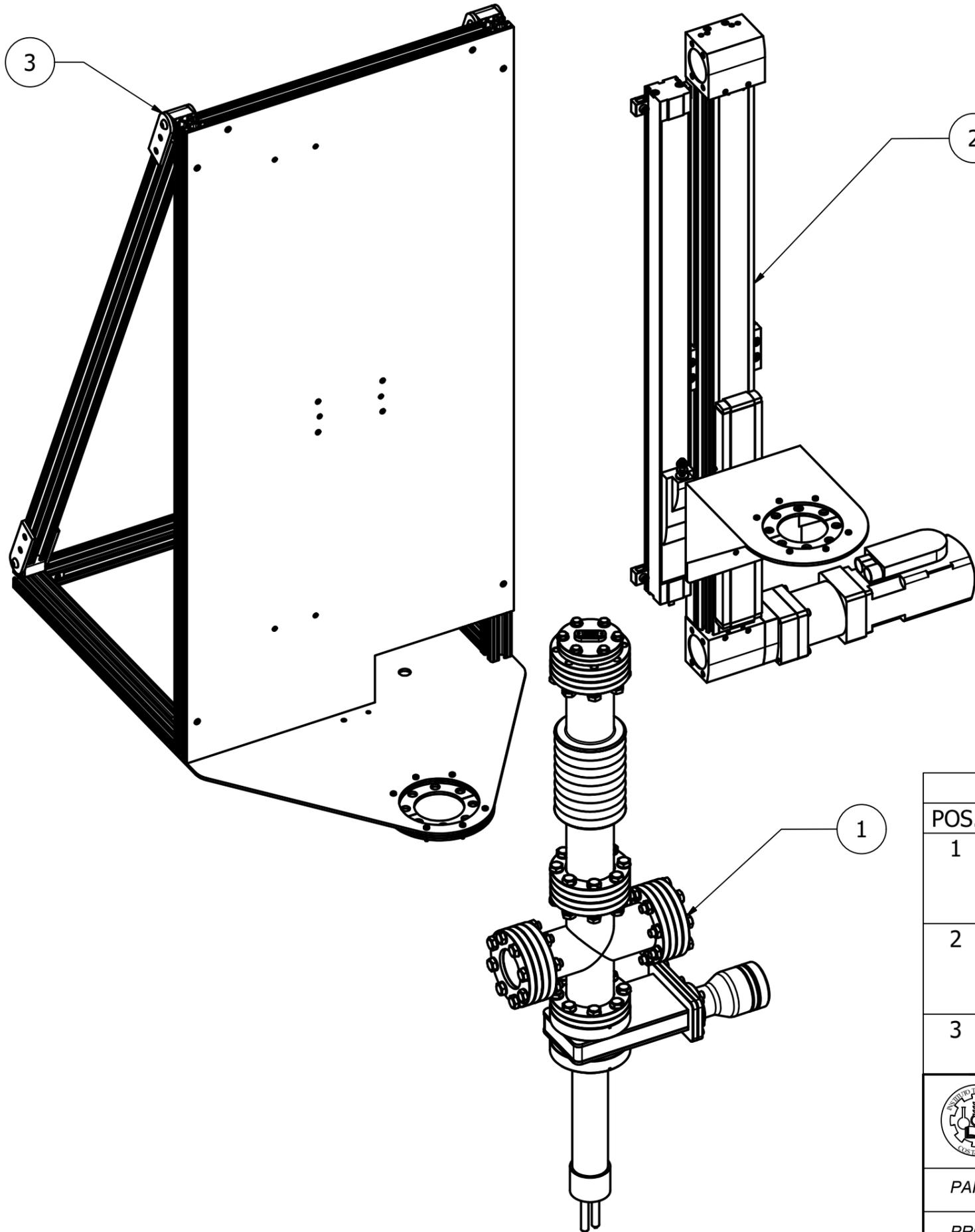
LÁMINA

PROYECTO: SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA
 SONDA DE LANGMUIR EN SCR-1

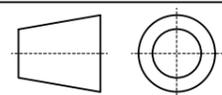


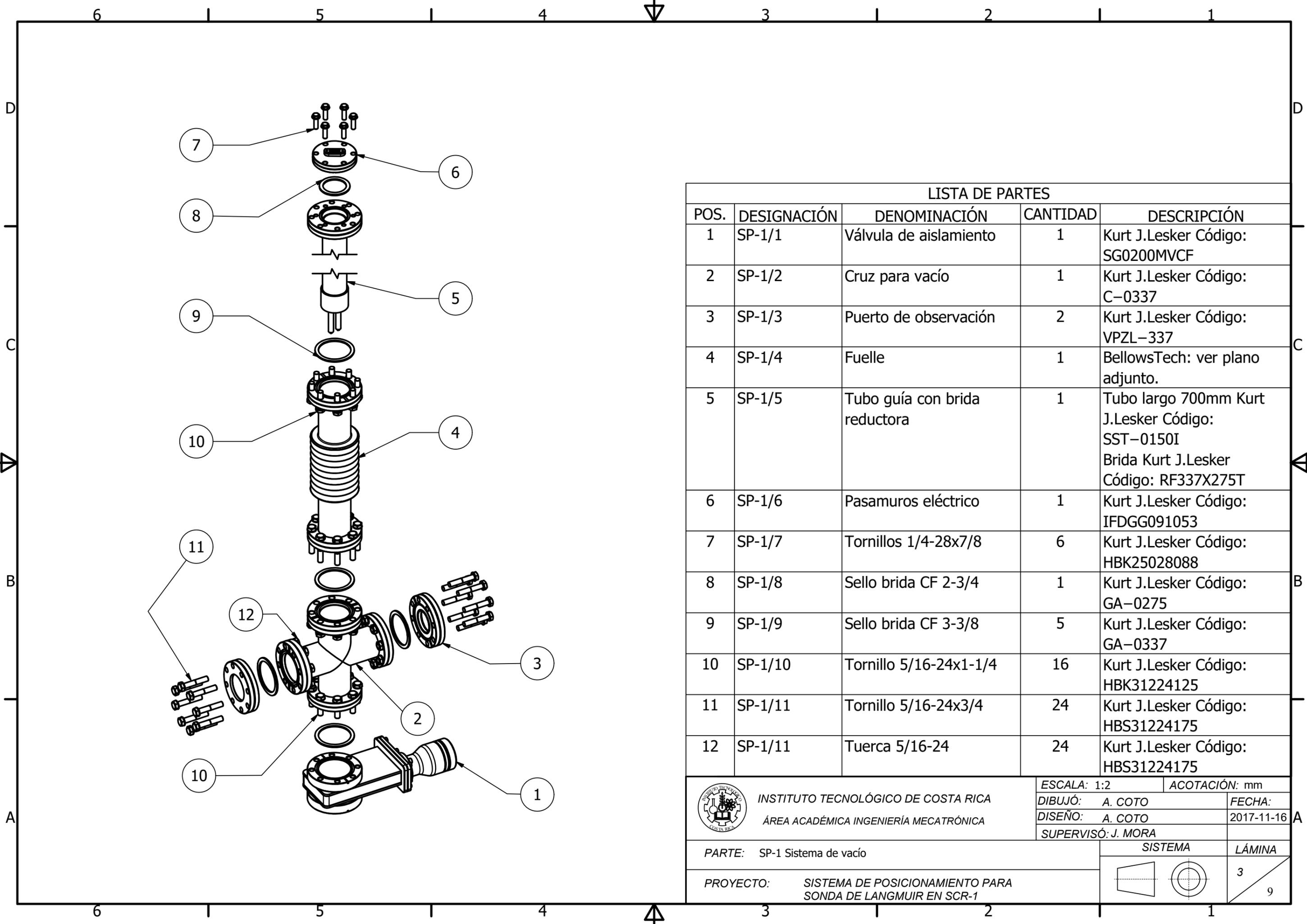
1

9

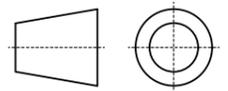


LISTA DE PARTES				
POS.	DESIGNACIÓN	DENOMINACIÓN	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
1	SP-1	Sistema de vacío	1	Movimiento de 20 pulgadas para presiones de ultra alto vacío.
2	SP-2	Sistema de movimiento	1	Velocidades de hasta 3.5 m/s ² con sensor de posición
3	SP-3	Soporte	1	Láminas de aluminio con extrusiones 80/20.

 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA	ESCALA: 1:5	ACOTACIÓN: mm
	DIBUJÓ: A. COTO	FECHA: 2017-11-16
	DISEÑO: A. COTO	
	SUPERVISÓ: J. MORA	
PARTE:	SISTEMA	LÁMINA
PROYECTO: SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA SONDA DE LANGMUIR EN SCR-1		2 / 9



LISTA DE PARTES				
POS.	DESIGNACIÓN	DENOMINACIÓN	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
1	SP-1/1	Válvula de aislamiento	1	Kurt J.Lesker Código: SG0200MVCF
2	SP-1/2	Cruz para vacío	1	Kurt J.Lesker Código: C-0337
3	SP-1/3	Puerto de observación	2	Kurt J.Lesker Código: VPZL-337
4	SP-1/4	Fuelle	1	BellowsTech: ver plano adjunto.
5	SP-1/5	Tubo guía con brida reductora	1	Tubo largo 700mm Kurt J.Lesker Código: SST-0150I Brida Kurt J.Lesker Código: RF337X275T
6	SP-1/6	Pasamuros eléctrico	1	Kurt J.Lesker Código: IFDGG091053
7	SP-1/7	Tornillos 1/4-28x7/8	6	Kurt J.Lesker Código: HBK25028088
8	SP-1/8	Sello brida CF 2-3/4	1	Kurt J.Lesker Código: GA-0275
9	SP-1/9	Sello brida CF 3-3/8	5	Kurt J.Lesker Código: GA-0337
10	SP-1/10	Tornillo 5/16-24x1-1/4	16	Kurt J.Lesker Código: HBS31224125
11	SP-1/11	Tornillo 5/16-24x3/4	24	Kurt J.Lesker Código: HBS31224175
12	SP-1/11	Tuerca 5/16-24	24	Kurt J.Lesker Código: HBS31224175

 <p>INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA</p>	ESCALA: 1:2		ACOTACIÓN: mm
	DIBUJÓ: A. COTO		FECHA:
	DISEÑO: A. COTO		2017-11-16
	SUPERVISÓ: J. MORA		
PARTE: SP-1 Sistema de vacío		SISTEMA	LÁMINA
PROYECTO: SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA SONDA DE LANGMUIR EN SCR-1			3 / 9

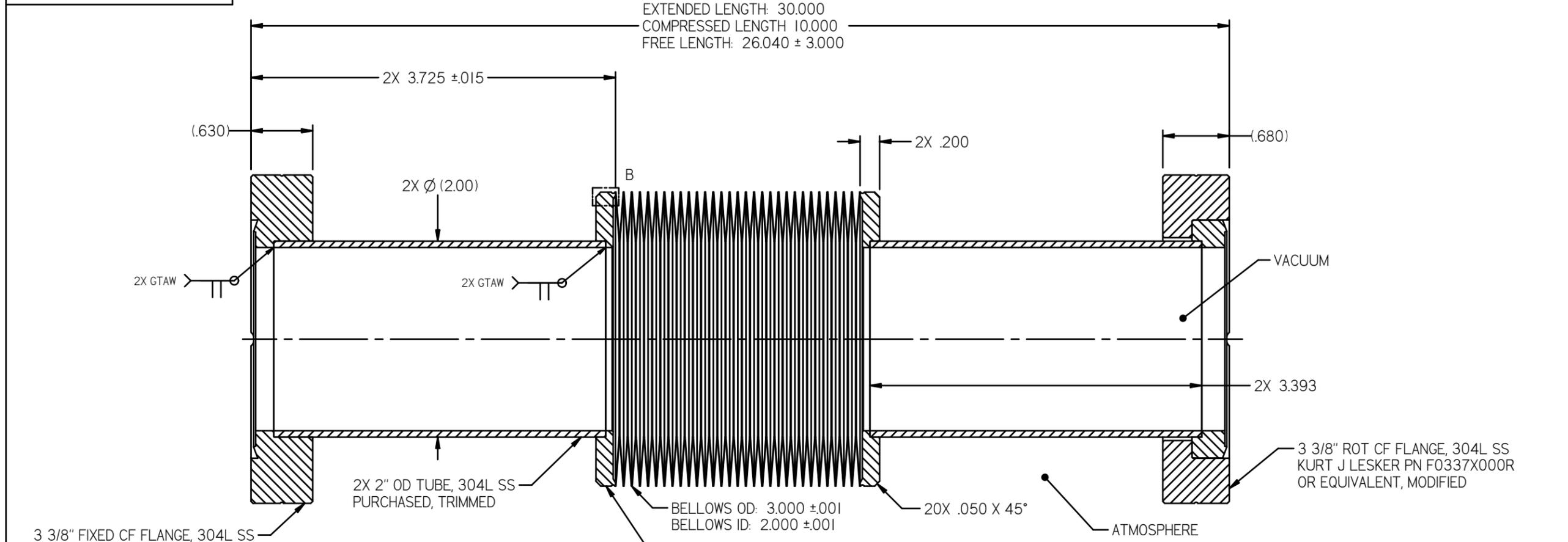
REV	ECO #	DESCRIPTION	APPRV	DATE

NOTES:

- AXIAL STROKE BELLOWS CORE:
OPERATING EXTENDED L: 22.500
OPERATING COMPRESSED L: 2.500
OPERATING STROKE: 20.000
- LATERAL OFFSET BELLOWS CORE:
OPERATING @ EXTENDED L: 0.00
OPERATING @ COMPRESSED L: 0.00
- ANGULAR OFFSET BELLOWS CORE:
OPERATING @ EXTENDED L: 0°
OPERATING @ COMPRESSED L: 0°
- TORQUE ON BELLOWS CORE:
OPERATING: 0.00 IN•OZ
- WELD PER BELLOWS TECH W10131 SPEC.
- DESIGN PRESSURE:
INSIDE CORE: -14.7 PSIG
OUTSIDE CORE: 0 PSIG
- CYCLES AT ROOM TEMP 77°F: **NOTE 17**
UNKNOWN, TBD BY CUSTOMER
- MATERIAL:
FLANGES: SEE PRINT
BELLOWS CORE: AM350 PER AMS 5548
- SPRING RATE:
1.0 +/- .50 LB/IN
- CHANGE IN VOLUME PER STROKE:
98.2 IN³
- LEAK RATE:
1 X 10⁻⁹ std cc He/SEC
- CLEAN & PACKAGE:
PER BELLOWS TECH W10100 & W10110 SPEC.
- APPLICABLE STANDARDS / SPECIFICATIONS:
ASME Y14.100-2004 ENGINEERING DRAWING PRACTICES.
ASME B46.1 SURFACE FINISH
ASME Y14.5M-2009 DIMENSIONING & TOLERANCING
- DIMENSIONS IN PARENTHESIS OR LABELED AS REFERENCE MAY DIFFER 20% OR MORE FROM ACTUAL MANUFACTURED DIMENSIONS. REFERENCE DIMENSIONS ARE NOT TO BE INTERPRETED AS HARD DIMENSIONS.
- DEBURR AND BREAK MACHINED COMPONENTS:
INSIDE CORNERS R.001 TO .008
OUTSIDE EDGES C.008 TO .015 X 45°
- G.D. & T:
ALL DIAMETERS EXCEPT MOUNTING HOLE DIAMETERS ON INDIVIDUAL MACHINED COMPONENTS MUST BE $\text{H}1009$ TO ONE CYLINDRICAL DATUM.
ALL DIAMETERS AND MOUNTING HOLE DIAMETERS ON INDIVIDUAL MACHINED COMPONENTS MUST BE $\text{L}1009$ TO ONE FLAT DATUM SURFACE.
- DUE TO CYCLE SPEED, THIS IS A BEST EFFORT DESIGN. BELLOWS CYCLE LIFE IS UNKNOWN AND TO BE DETERMINED BY CUSTOMER.

BELLOWS CORE FOR VISUAL REPRESENTATION ONLY

END TO END ALIGNMENT: NONE



3 3/8" FIXED CF FLANGE, 304L SS
KURT J LESKER PN F0337X000N
OR EQUIVALENT, MODIFIED

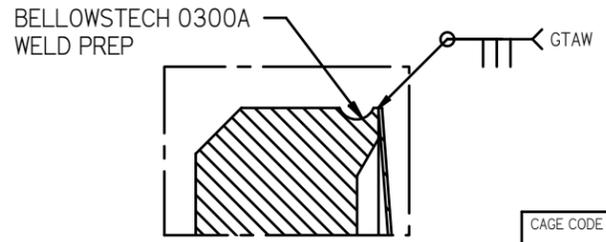
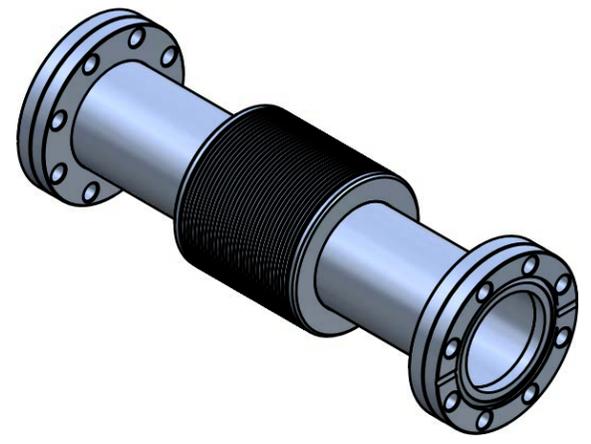
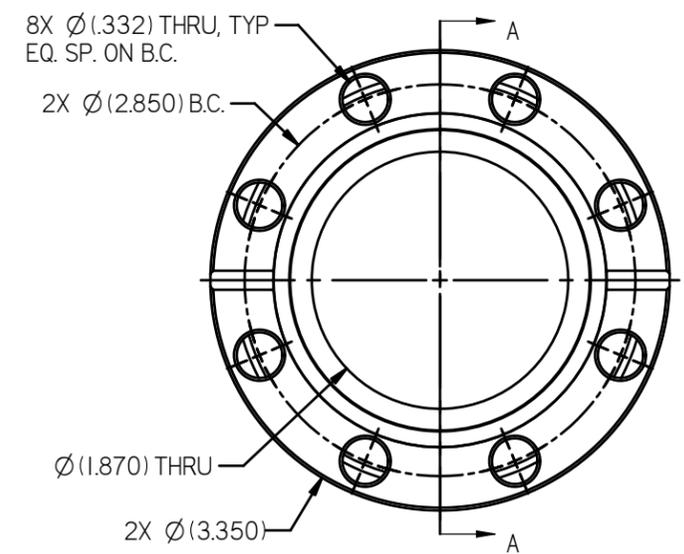
2X 2" OD TUBE, 304L SS
PURCHASED, TRIMMED

BELLOWS OD: 3.000 ± 0.001
BELLOWS ID: 2.000 ± 0.001

2X RING FLANGE, 316L SS
PER AMS 5511 OR 5653
MATCH TO TUBE

3 3/8" ROT CF FLANGE, 304L SS
KURT J LESKER PN F0337X000R
OR EQUIVALENT, MODIFIED

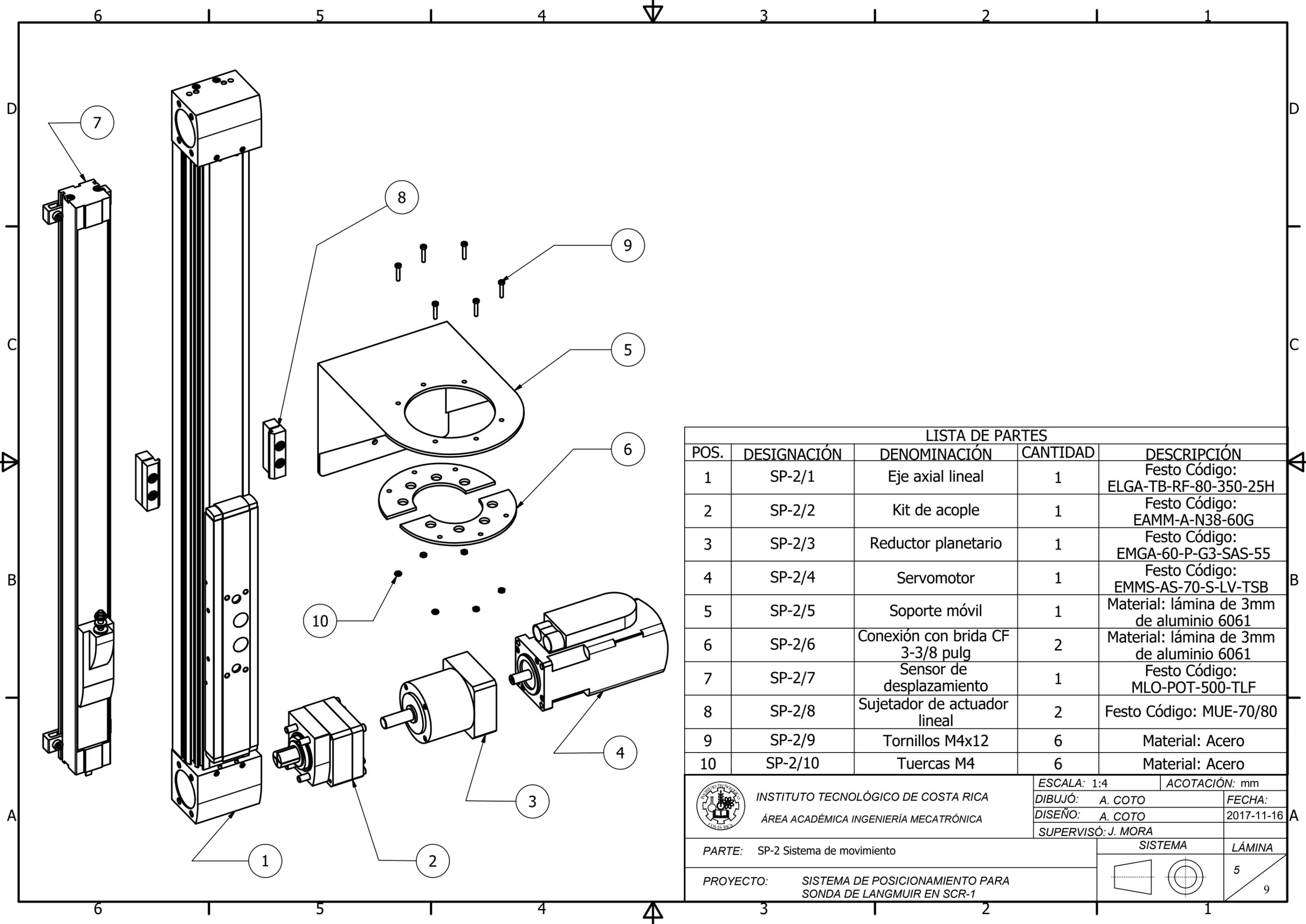
SECTION A-A, SHOWN AT COMPRESSED LENGTH



2X DETAIL B

QUOTE REFERENCE ONLY NOT TO BE USED FOR MANUFACTURING OR DEVELOPMENT.

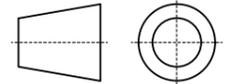
CAGE CODE IUEL3		SIZE B	SCALE: NONE	BellowsTech Confidential	
U.S. TOLERANCES / ASME Y14.5 2009		BellowsTech, LLC. 1289 N. US Highway 1, Suite #1 Ormond Beach, FL 32174 PH: 386-615-7530 FAX: 386-615-7973		TITLE: BELLOWS ASSEMBLY	
X.XXXX ± .0005	X° ± 1°	DRAWN: MRR		DATE: 18SEP17	
X.XXX ± .005	XX° ± .5°				
X.XX ± .010	XXX° ± .25°				
X.X ± .050	FRACTIONS ± 1/64				
32 ✓	THIRD ANG. PROJ.	DIMS IN INCHES	APPROVAL:		SHEET: 1 of 1
P/N: 0300A-179 Rev 1					



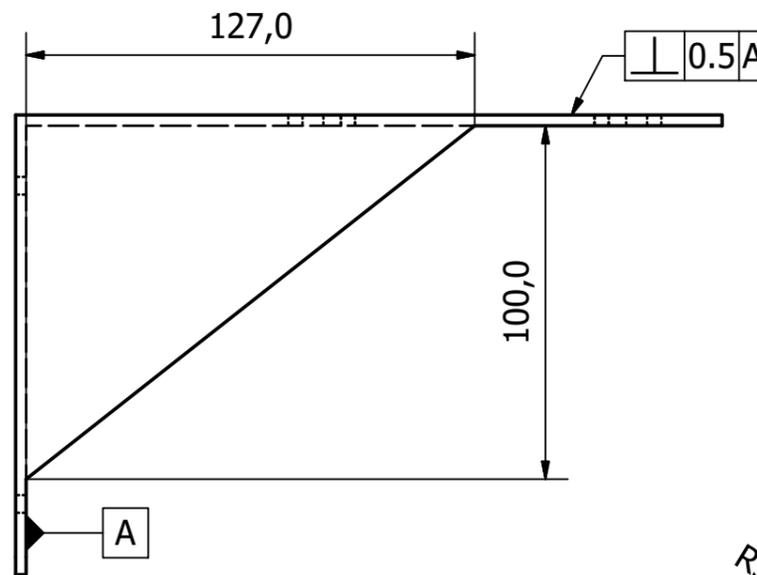
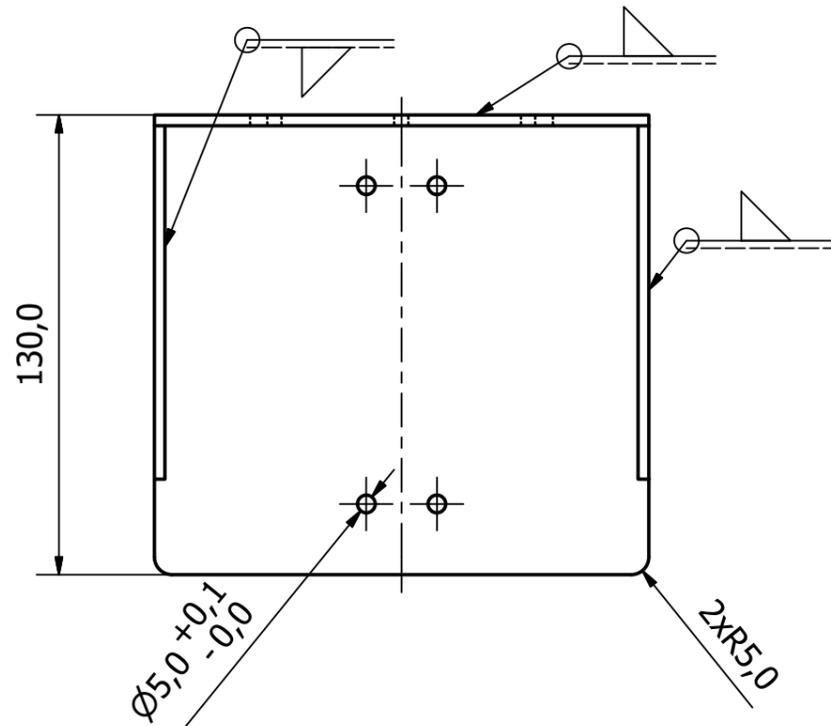
LISTA DE PARTES

POS.	DESIGNACIÓN	DENOMINACIÓN	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
1	SP-2/1	Eje axial lineal	1	Festo Código: ELGA-TB-RF-80-350-25H
2	SP-2/2	Kit de acople	1	Festo Código: EAMM-A-N38-60G
3	SP-2/3	Reductor planetario	1	Festo Código: EMGA-60-P-G3-SAS-55
4	SP-2/4	Servomotor	1	Festo Código: EMMS-AS-70-S-LV-TSB
5	SP-2/5	Soporte móvil	1	Material: lámina de 3mm de aluminio 6061
6	SP-2/6	Conexión con brida CF 3-3/8 pulg	2	Material: lámina de 3mm de aluminio 6061
7	SP-2/7	Sensor de desplazamiento	1	Festo Código: MLO-POT-500-TLF
8	SP-2/8	Sujetador de actuador lineal	2	Festo Código: MUE-70/80
9	SP-2/9	Tornillos M4x12	6	Material: Acero
10	SP-2/10	Tuercas M4	6	Material: Acero

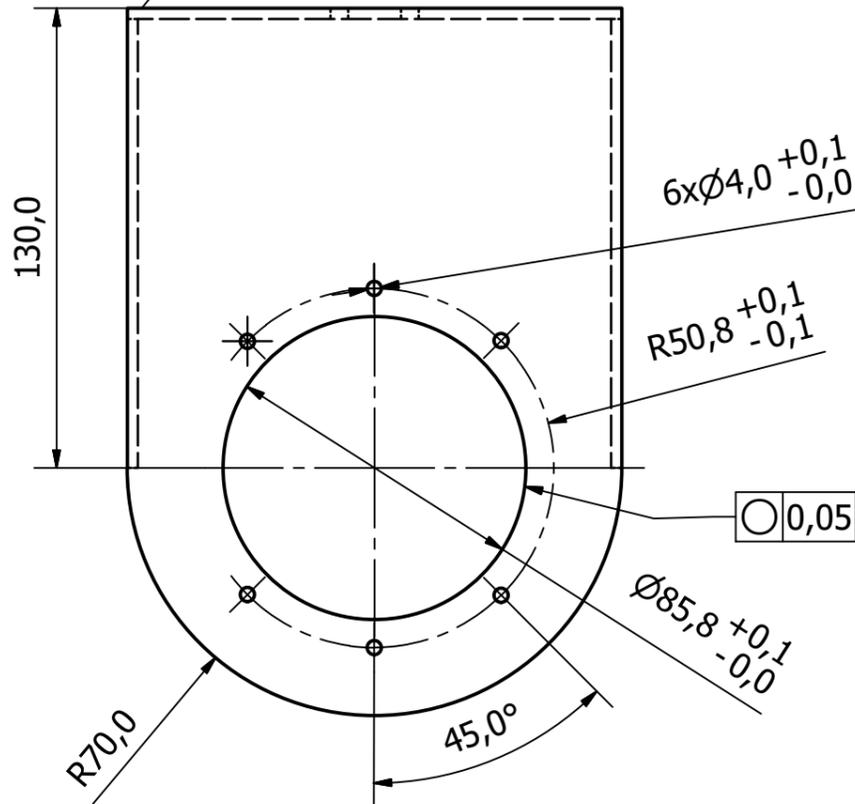
 <p>INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA</p>	ESCALA: 1:4	ACOTACIÓN: mm
	DIBUJÓ: A. COTO	FECHA:
	DISEÑO: A. COTO	2017-11-16
	SUPERVISÓ: J. MORA	

PARTE: SP-2 Sistema de movimiento	SISTEMA	LÁMINA
PROYECTO: SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA SONDA DE LANGMUIR EN SCR-1		5 / 9

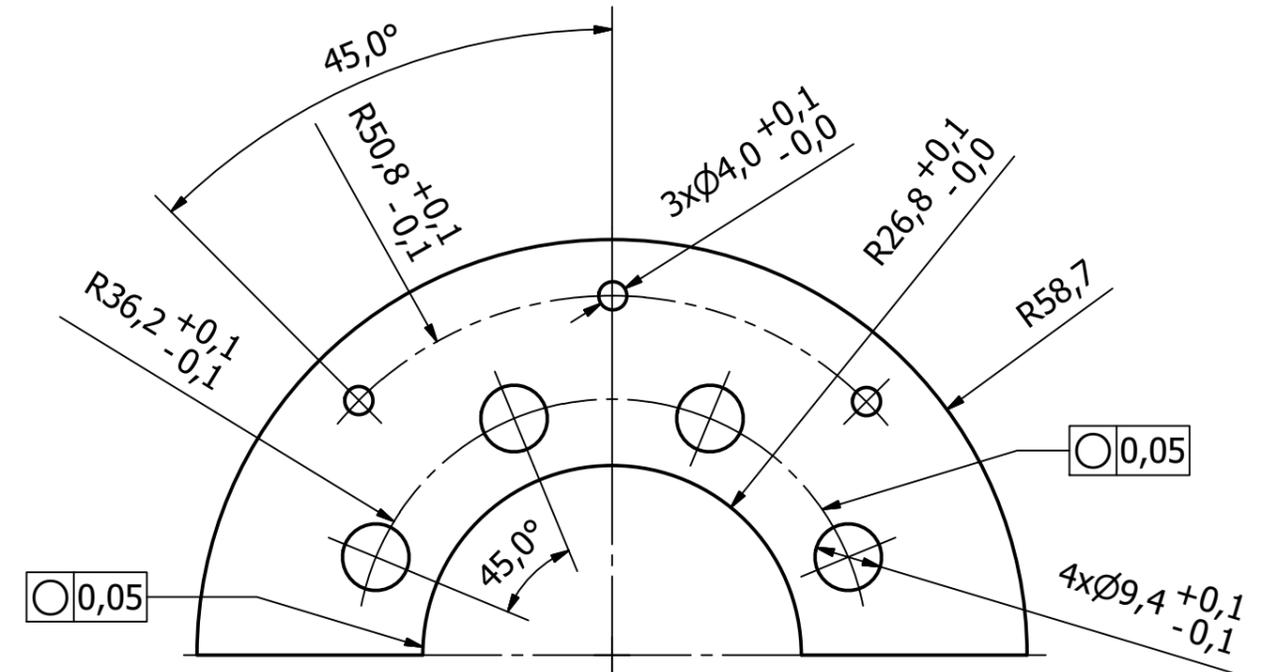
Pieza 2/5: Base de soporte
 Designación: SP-2/5
 Material: Aluminio 6061 3mm
 Cantidad: 1



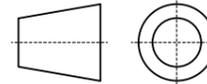
ESCALA: 1:2

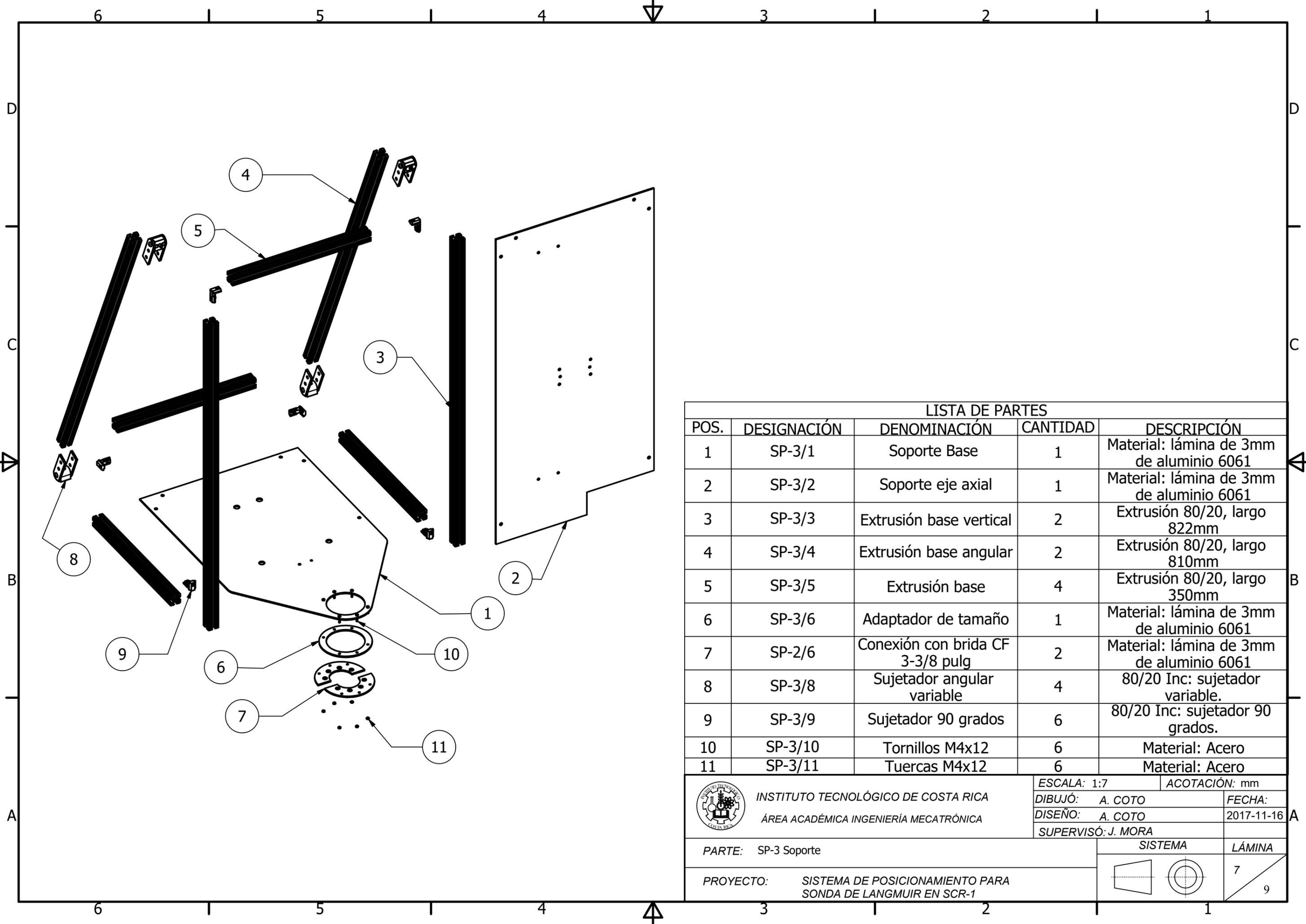


Pieza 2/6: Conexión con brida CF 3-3/8pulg
 Designación: SP-2/6
 Material: Aluminio 6061 3mm
 Cantidad: 2

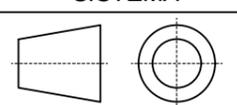


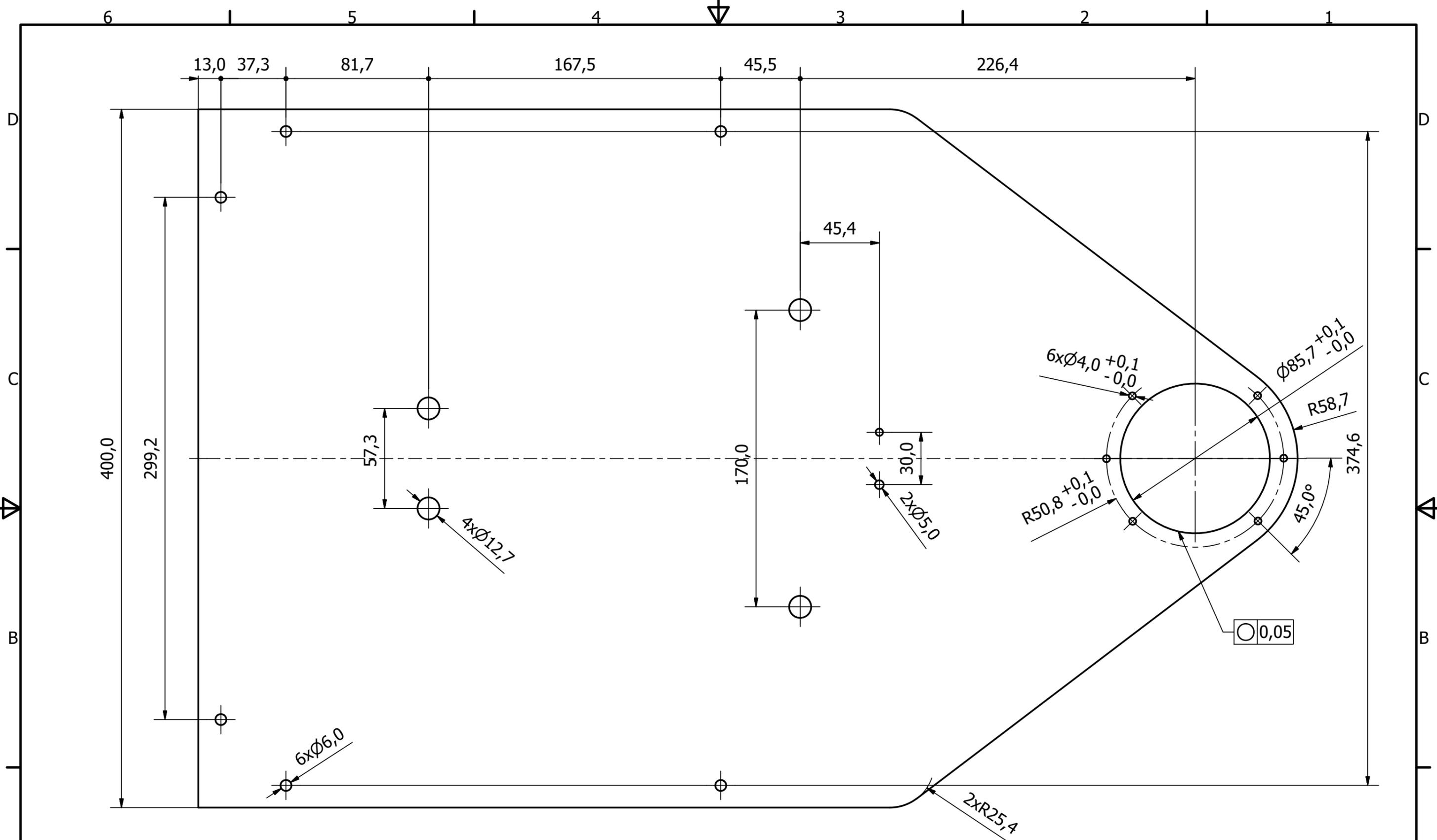
ESCALA: 1:1

 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA	ESCALA: INDICADA	ACOTACIÓN: mm
	DIBUJÓ: A. COTO	FECHA: 2017-11-16
	DISEÑO: A. COTO	
	SUPERVISÓ: J. MORA	
PARTE: SP-2/5 Base de soporte, SP-2/6 Conexión con brida CF 3-3/8pulg	SISTEMA	LÁMINA
PROYECTO: SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA SONDA DE LANGMUIR EN SCR-1		6 / 9

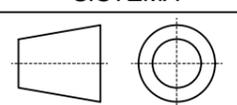


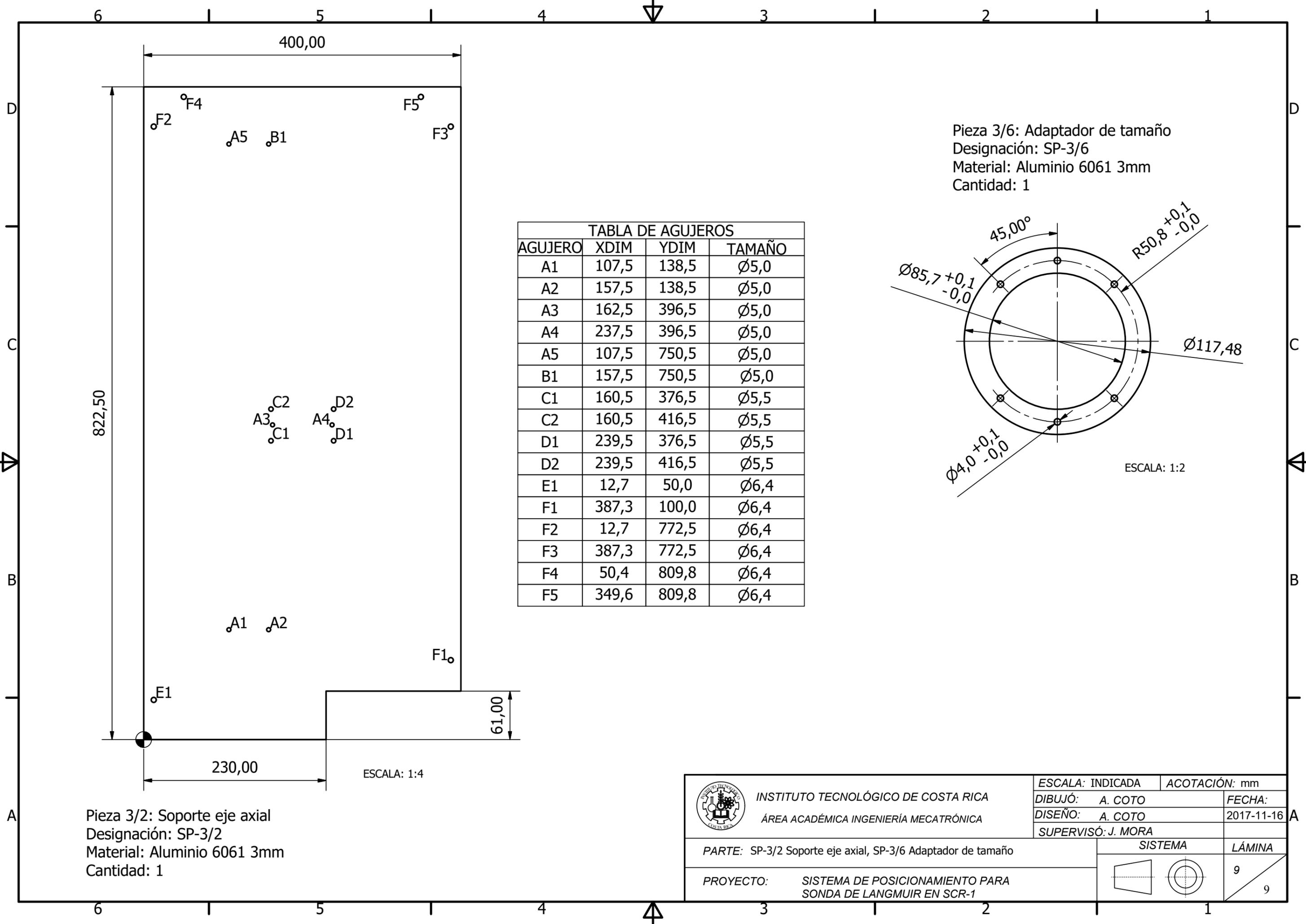
LISTA DE PARTES				
POS.	DESIGNACIÓN	DENOMINACIÓN	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
1	SP-3/1	Soporte Base	1	Material: lámina de 3mm de aluminio 6061
2	SP-3/2	Soporte eje axial	1	Material: lámina de 3mm de aluminio 6061
3	SP-3/3	Extrusión base vertical	2	Extrusión 80/20, largo 822mm
4	SP-3/4	Extrusión base angular	2	Extrusión 80/20, largo 810mm
5	SP-3/5	Extrusión base	4	Extrusión 80/20, largo 350mm
6	SP-3/6	Adaptador de tamaño	1	Material: lámina de 3mm de aluminio 6061
7	SP-2/6	Conexión con brida CF 3-3/8 pulg	2	Material: lámina de 3mm de aluminio 6061
8	SP-3/8	Sujetador angular variable	4	80/20 Inc: sujetador variable.
9	SP-3/9	Sujetador 90 grados	6	80/20 Inc: sujetador 90 grados.
10	SP-3/10	Tornillos M4x12	6	Material: Acero
11	SP-3/11	Tuercas M4x12	6	Material: Acero

 <p>INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA</p>	ESCALA: 1:7		ACOTACIÓN: mm
	DIBUJÓ: A. COTO	FECHA: 2017-11-16	
	DISEÑO: A. COTO		
	SUPERVISÓ: J. MORA		
PARTE: SP-3 Soporte	SISTEMA		LÁMINA
PROYECTO: SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA SONDA DE LANGMUIR EN SCR-1			7 9



Pieza 3/1: Soporte base
 Designación: SP-3/1
 Material: Aluminio 6061 3mm
 Cantidad: 1

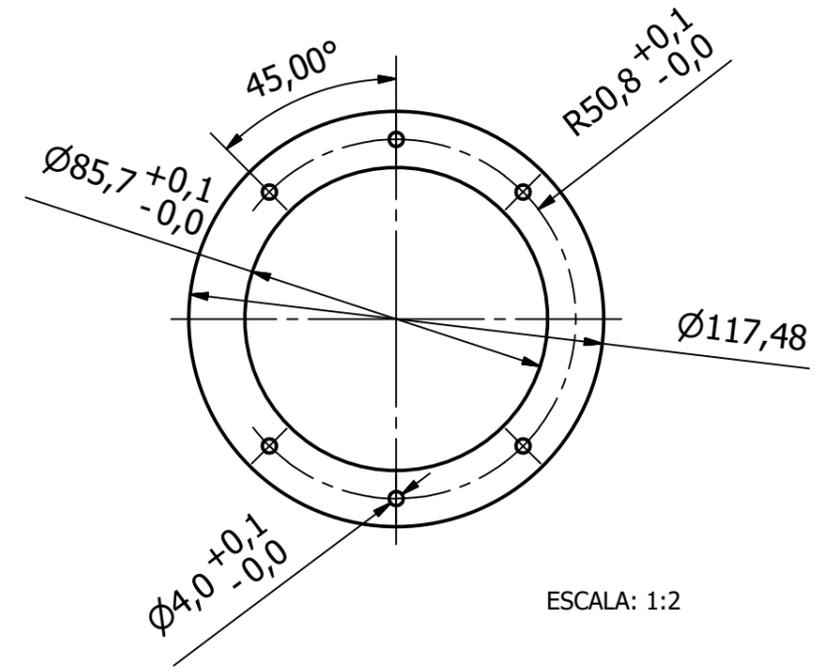
 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA	ESCALA: 1:2	ACOTACIÓN: mm
	DIBUJÓ: A. COTO	FECHA: 2017-11-16
	DISEÑO: A. COTO	
	SUPERVISÓ: J. MORA	
PARTE: SP-3/1 Soporte base	SISTEMA	LÁMINA
PROYECTO: SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA Sonda de Langmuir en SCR-1		8 / 9



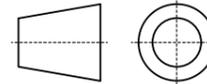
Pieza 3/6: Adaptador de tamaño
 Designación: SP-3/6
 Material: Aluminio 6061 3mm
 Cantidad: 1

TABLA DE AGUJEROS

AGUJERO	XDIM	YDIM	TAMAÑO
A1	107,5	138,5	Ø5,0
A2	157,5	138,5	Ø5,0
A3	162,5	396,5	Ø5,0
A4	237,5	396,5	Ø5,0
A5	107,5	750,5	Ø5,0
B1	157,5	750,5	Ø5,0
C1	160,5	376,5	Ø5,5
C2	160,5	416,5	Ø5,5
D1	239,5	376,5	Ø5,5
D2	239,5	416,5	Ø5,5
E1	12,7	50,0	Ø6,4
F1	387,3	100,0	Ø6,4
F2	12,7	772,5	Ø6,4
F3	387,3	772,5	Ø6,4
F4	50,4	809,8	Ø6,4
F5	349,6	809,8	Ø6,4



Pieza 3/2: Soporte eje axial
 Designación: SP-3/2
 Material: Aluminio 6061 3mm
 Cantidad: 1

 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA	ESCALA: INDICADA	ACOTACIÓN: mm
	DIBUJÓ: A. COTO	FECHA: 2017-11-16
	DISEÑO: A. COTO	
	SUPERVISÓ: J. MORA	
PARTE: SP-3/2 Soporte eje axial, SP-3/6 Adaptador de tamaño	SISTEMA	LÁMINA
PROYECTO: SISTEMA DE POSICIONAMIENTO PARA SONDA DE LANGMUIR EN SCR-1		9/9