



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE PRENSA
TERMO-NEUMÁTICA PARA FABRICACIÓN DE
ELECTRODOS POROSOS**

TESIS

Para obtener el grado de
Ingeniero en Sistemas de Energía

PRESENTA

Álvaro Luciano Belin Sandoval

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool

ASESORES

Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta

Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar

Dr. Inocente Bojórquez Báez

Dra. Beatriz Escobar Morales





UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**Trabajo de tesis bajo la supervisión del comité de asesoría y
aprobada como requisito para obtener el grado de:**
INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA



COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:

Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool

ASESOR:

Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar

ASESOR:

Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta

CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, JULIO DE 2016

Página en blanco.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi comité de tesis, que lo conforman: el Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool, el Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta, el Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar, el Dr. Inocente Bojórquez Báez y especialmente a la Dra. Beatriz Escobar Morales, quien en todo momento tuvo la disposición de asistirme y apoyarme en lo que estuviera dentro de sus posibilidades.

Agradezco al personal técnico y académico de la Gerencia de Energías Renovables del Instituto de Investigaciones Eléctricas por el apoyo con el maquinado de las piezas de la armadura de soporte, así como de la asesoría técnica proporcionada, en especial al Dr. Ulises Cano Castillo y al M.I. Félix Loyola.

También agradezco la colaboración del personal de la unidad de energías renovables del Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán (CICY), al Dr. Víctor Manuel Ramírez Rivera y al Ing. Gustavo Martínez Tapia por el soporte técnico recibido durante mi estancia de investigación.

Agradezco al Ing. Fernando Castro de la compañía Festo Pneumatics por el apoyo en la programación del sistema de prensado.

Un especial agradecimiento al CONACYT (proyecto SEP- CB-2013/221988) y al PRODEP, por el apoyo económico brindado bajo el proyecto UQROO-PTC-119 así como a la División de Ciencias e Ingeniería y al programa de Redes Temáticas de Hidrógeno (RTH2).

A mis padres, Álvaro y Valentina, por el apoyo que me han brindado durante mi formación profesional, por la confianza que me han concedido durante toda mi vida y por cada enseñanza que ha ayudado a formar a la persona que ahora soy.

Página en blanco.

CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 1 LA CELDA DE COMBUSTIBLE	5
1.1 Fundamentos	5
1.2 Componentes de una PEMFC	6
1.2.1 Ensamble membrana electrodo (MEA)	6
1.2.2 Tipos de ensamble membrana-electrodo	8
1.2.3 Placas bipolares	9
1.3 Análisis de mercado en sistemas de prensado	10
CAPÍTULO 2 DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO	13
2.1 Diseño del prototipo	13
2.2 Estudio de esfuerzos mecánicos	14
2.2.1 Armadura de soporte	14
2.3 Simulación computarizada de esfuerzos mecánicos	18
2.3.1 Resultados del estudio	19
2.4 Módulo térmico	28
2.4.1 Diseño, modelado y simulación del módulo térmico	30
CAPÍTULO 3 MANUFACTURA DEL PROTOTIPO	35
3.1 Armadura de soporte	35
3.2 Sistema electro-neumático	38
3.2.1 Circuito neumático	38
3.2.2 Circuito eléctrico	49
CAPÍTULO 4 DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL	58
4.1 Características de la unidad de control	58
4.1.1 Interconexión de entradas y salidas	60
4.2 Unidad de Organización de Programas (POU)	61
4.2.1 Plano Secuencial de Funciones (SFC)	62
4.2.2 Diagrama de Bloques (BD)	62
4.2.3 Diagrama de Escalera (LD)	63
4.3 Ciclo de trabajo	63
4.3.1 Programa REVISION_INICIAL(PRG)	65
4.3.2 Programa PLC_PRG(PRG)	65
4.4 Interfaz visual generada	66
CONCLUSIONES	71
PERSPECTIVAS	72
ANEXOS	73
BIBLIOGRAFÍA	74

RESUMEN

Este trabajo documenta el diseño, construcción y programación de un sistema automático de prensado termo-neumático para la manufactura de electrodos porosos de celdas de combustible, así como el análisis de su operación. El sistema de prensado es controlado por un controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés). En este estudio se determinaron los valores de presión y temperatura adecuados de operación de la prensa, así como la razón de cambio de estas variables con el objetivo de generar rampas de presión y temperatura. También se realizaron los análisis de esfuerzos mecánicos y térmicos del ensamblado de la prensa, así como el funcionamiento de la unidad térmica, la cual funciona con un control PID (Proporcional-Integral-Derivativo).

Para armar este sistema se procedió al diseño, construcción y ensamblado de las placas superior e intermedias de la armadura de soporte al cilindro de fuerza, posteriormente se llevaron a cabo pruebas preliminares del sistema conectándolo al gabinete de control y a la línea de presión neumática. Asimismo, se hicieron pruebas del sistema térmico usando una resistencia sumergida en agua junto con un sensor de temperatura basado en una RTD (Resistive Temperature Detector, por sus siglas en inglés), esto con la finalidad de comprobar el adecuado funcionamiento del control de temperatura.

Las pruebas de operación del sistema realizadas bajo rangos de presión de 5 bar y 85°C resultaron satisfactorias a un aumento de 1 bar/s, sin embargo, se encontraron ciertas dificultades para estabilizar el aumento de la temperatura con el control PID, y que la parte integral del control consiste en una operación la cual resultaba en inestabilidad al momento de usar valores pequeños de aumento. Sin embargo, al modificar estos valores, el aumento proporcional de la temperatura se llevó a cabo con resultados positivos.

INTRODUCCIÓN

Debido al incremento de la demanda mundial de energía y los numerosos daños al planeta causados por el uso desmesurado de las fuentes fósiles, la contribución de las energías renovables ha crecido significativamente en las estadísticas mundiales, con el objetivo de alcanzar en un mediano plazo un desarrollo cada vez más sustentable [1].

Además, con las constantes problemáticas relacionados con el uso del petróleo y la preocupación respecto al calentamiento global, la población se ha mostrado más interesada en el cuidado del medio ambiente. Siendo una de las temáticas de mayor alcance la que respecta a vehículos impulsados por tecnologías de energía alternativas como biocombustibles o hidrógeno, así como el uso de baterías más eficientes y la utilización de la tecnología del hidrógeno, específicamente, las celdas de combustibles para aplicaciones portátiles. Aunado, está el creciente costo de la electricidad y los problemas de confiabilidad del sistema de distribución de energía, la demanda de fuentes de energía renovables para alimentar eléctricamente las edificaciones está en aumento.

Las celdas de combustible trabajan con hidrógeno, el cual puede ser obtenido de una variedad de combustibles que van desde el etanol y el metanol, hasta combustibles fósiles convencionales como el propano o el gas natural (este último necesita ser reformado para extraer el hidrógeno). También puede ser alimentada por hidrógeno puro producido industrialmente, como un subproducto del vapor reformado de gas natural. Más recientemente, se han explorado otros métodos de generación como la electrólisis del agua, proceso que consiste en separar la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno, para llevar a cabo este proceso se puede utilizar energía solar o eólica[2].

Las celdas de combustible son una fuente de energía prometedora a causa de su alta eficiencia y bajas emisiones contaminantes. Las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC por sus siglas en inglés) han atraído considerablemente la atención como una fuente de energía viable para el transporte y aplicaciones portátiles, por su baja temperatura de operación y rápido encendido [3].

Este trabajo se enfoca en uno de los procesos de manufactura de uno de los componentes más importantes de las celdas de combustible, específicamente en la fabricación de ensambles membrana-electrodo (MEA). Se considera que uno de los retos más importantes se encuentra en la fabricación de la MEA debido principalmente a problemas relacionados con el control de la presión y temperatura, parámetros necesarios para llevar a cabo el ensamblado. Sin dejar de lado que los sistemas que realizan estos procesos son muy caros. En la actualidad, mucho se ha hablado y escrito respecto a las características técnicas de las celdas de combustible, sin embargo, existe poca información respecto a los equipos utilizados para su fabricación. Cabe mencionar, que se han realizado pocos esfuerzos para alcanzarla automatización de los procesos que implica el ensamblado de la MEA. Respecto a la problemática ya descrita, surge el alcance de este documento, el

cual abarca la definición de los retos técnicos, económicos, tecnológicos y el desarrollo del proceso de construcción del primer prototipo automático especializado en la manufactura de celdas de combustible para fines de investigación en Quintana Roo.

OBJETIVOS

GENERAL

Desarrollar un sistema automático para el ensamblado de electrodos porosos utilizados en celdas de combustible tipo PEM.

ESPECÍFICOS

- 1) Diseñar el sistema de prensado para definir sus capacidades mecánicas y térmicas, contemplando la seguridad de las personas y equipos, así como los rangos deseados de operación.
- 2) Diseñar una estrategia de control y automatización que permita sistematizar las variables: temperatura, presión y tiempo de prensado para evitar una formación micro estructural no deseada del electrodo.
- 3) Analizar las condiciones del mercado para delimitar el diseño en función de los requisitos técnicos y la disponibilidad de los componentes.
- 4) Construcción, ensamblado y programación de los componentes para validar las condiciones de diseño.

CAPÍTULO 1

LA CELDA DE COMBUSTIBLE

1.1 Fundamentos

Las celdas de combustible (FCs, *fuel cells*) convierten la energía libre de una reacción química directamente en energía eléctrica. Existe una gran variedad de tipos de FCs. Este estudio se enfoca fundamentalmente en el desarrollo de unos de los componentes principales de las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFCs, *proton exchange membrane fuel cells*). El funcionamiento de las PEMFCs, es básicamente el siguiente: en el lado del ánodo, hidrógeno gaseoso humidificado es suministrado a través de los campos de flujo de la placa bipolar, la cual permite la distribución de dicho gas a través de un medio de difusión poroso denominado ensamble membrana electrodo (MEA, *membrane-electrode assembly*); el cual a su vez está compuesto por una capa catalítica (CL, *catalyst layer*), una membrana (electrolito sólido polimérico) y una capa difusora de gases (GDL, *gas diffusion layer*). En la CL, por la acción de un catalizador, los átomos de hidrógeno se disocian en protones y electrones. Los electrones viajan por medio de un circuito externo llevando carga eléctrica, mientras que los protones son permeados a través del electrolito polimérico, combinándose con el oxígeno en el lado del cátodo, para formar agua [4]. En la figura 1.1 se muestra un esquema elemental del funcionamiento de una PEMFC.

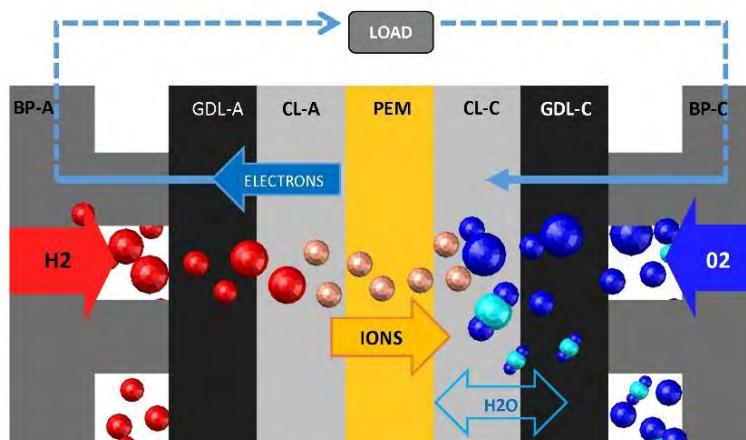


Figura 1.1 Diseño esquemático de una celda de combustible tipo PEM [4].

En las siguientes secciones se describe cada uno de los componentes que constituyen la FC y que son considerados fundamentales para el diseño y el buen desempeño del sistema.

1.2 Componentes de una PEMFC

1.2.1 Ensamble Membrana-Electrodo (MEA)

La MEA provee los elementos necesarios para que las reacciones químicas que ocurren dentro de las FCs se lleven a cabo, es decir permite convertir el combustible en energía eléctrica utilizable. Diferentes investigadores y fabricantes usan diversas terminologías al momento de referirse a la MEA. Algunos se refieren a este sólo como la membrana y los electrodos porosos; mientras que otros se refieren al ensamblado de 5 capas, membrana, dos capas catalíticas (una del lado del ánodo y otra del lado del cátodo) y dos difusores. En este documento se referirá a la MEA como el ensamblado de 5 capas. En la figura 1.2a) se muestra la configuración ideal de una MEA, mientras que en la figura 1.2b) se observa una sección transversal de un ensamblado real.

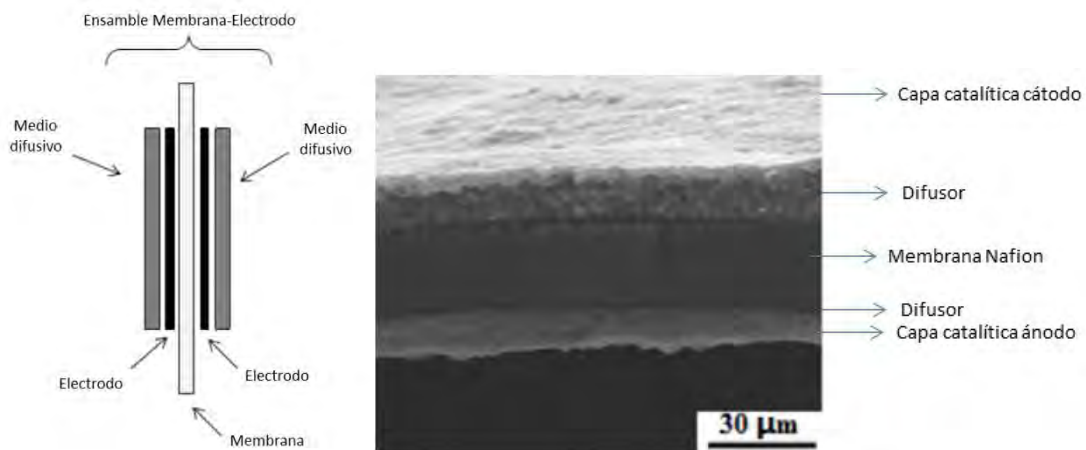


Figura 1.2. a) Configuración ideal de una MEA y b) sección transversal de una típica MEA real [5].

La MEA es considerada por muchos investigadores el corazón de la PEMFC, los elementos que la componen se describen a continuación.

Membrana

La membrana tiene dos funciones principales en una FC; la primera es separar el combustible y el oxidante y la segunda es la de transportar los protones a través de ella, desde el ánodo hasta el cátodo para completar la reacción de óxido-reducción. También debe proveer una fuerte

estabilidad mecánica, química y electroquímica en ambientes químicamente difíciles, por sobre un rango de condiciones de operación, y que al mismo tiempo pueda ofrecer larga vida útil, baja permeabilidad reactiva, alta conductividad protónica y servir como un aislante eléctrico efectivo.

Capa difusora de gas

La capa difusora es un medio poroso el cual permite el transporte del reactante desde los campos de flujo y lo dispersa de manera uniforme sobre la capa catalítica. Aparte de esta función clave, también sirve como un medio de transporte para los electrones en su viaje hacia el circuito externo vía las placas bipolares, de modo que debe tener una baja resistividad electrónica. Dada la conductividad y estabilidad en el ambiente de la celda de combustible, la tela de carbón o papel han sido ampliamente utilizados como medios difusores.

Electrodos

Son típicamente estructuras compuestas de partículas catalíticas de tamaños nanométricos, dispersadas en un medio poroso [2]. Los catalizadores suelen ser soportados en materiales a base de carbono para promover la dispersión, reducir la carga catalítica y aumentar la conductividad eléctrica. Es importante definir adecuadamente las vías para la difusión del reactante hacia el catalizador, la remoción de los productos de la reacción, así como una buena conductividad electrónica y protónica. Los electrones generados durante la reacción tienen que ser transportados al circuito exterior, mientras que los protones tienen que cruzar el electrolito para completar la reacción en el cátodo. La conductividad eléctrica en el electrodo es proveída por el soporte de carbón, en caso de catalizadores soportados y para los no soportados, los electrones los provee el catalizador en sí. Las interfaces entre los componentes de la MEA y el límite trifásico entre el reactante, el catalizador y el ionómero definen el desempeño de la celda de combustible [4].

Anteriormente el PTFE (politetrafluoretileno) fue utilizado como aglutinante en el electrodo, pero se requería de una alta carga de catalizador para lograr un desempeño adecuado. Posteriormente, en [6] los autores propusieron un electrodo de estructura distinta, donde el catalizador y el ionómero son mezclados como “tinta” y aplicados sobre papel (cast), para formar la capa catalítica, todo esto con un cero contenido de PTFE. Tales electrodos, donde un ionómero es utilizado como aglutinante (típicamente Nafion) son llamados electrodos de “capa delgada”.

1.2.2 Tipos de Ensamble Membrana-Electrodo

Esencialmente, existen dos tipos de tipos de ensambles y están diferenciados con base en dónde la solución catalizadora es depositada para formar al electrodo. Los ensambles con CCMs (Catalyst Coated Membranes) son aquellos donde la tinta catalizadora es aplicada directamente sobre la membrana. Ahora, si la tinta es aplicada sobre la capa difusora para formar un electrodo y luego prensada sobre el polímero de la membrana, el ensamble es denominado CCS (Catalyst Coated Substrate).

En la manufactura de ensambles tipo CCM, la literatura indica que puede ser introducido un paso intermedio, vertiendo el electrodo en una película de teflón como sustrato temporal para después, con termo-prensado, adherirlo a la membrana y finalmente remover la película de teflón. A este proceso se le conoce como DTM (Decal Transfer Method). En la figura 1.3 se observa esquemáticamente el proceso de la preparación de una MEA por este método.

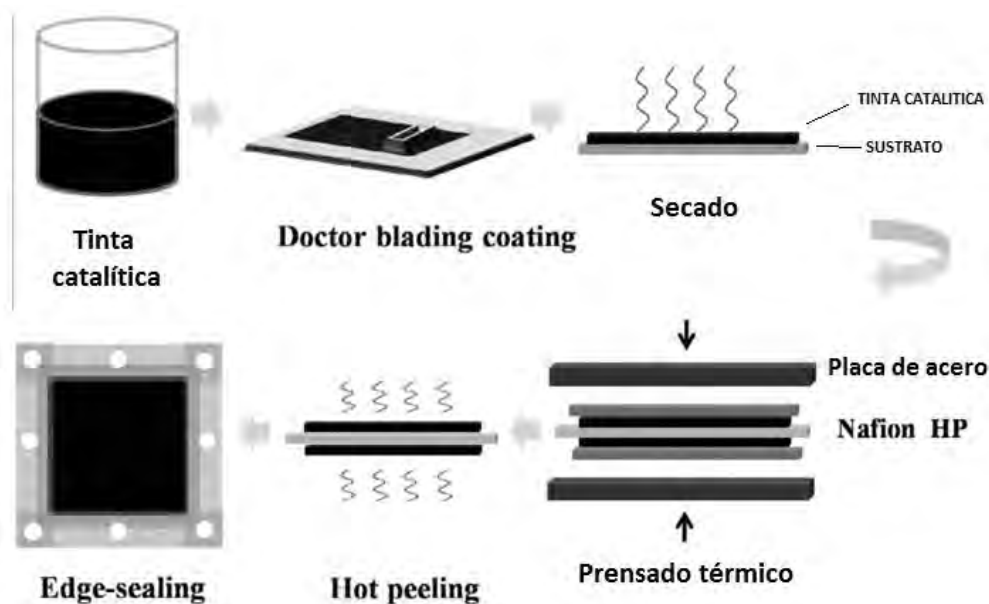


Figura 1.3. Diagrama esquemático del proceso de formación de un -MEA por el método DTM [7].

Cabe mencionar que el sub-proceso DTM ayuda a resolver el inconveniente de la deformación del Nafion, lo que causa muchos problemas en la aplicación y secado del electrodo cuando es aplicado directamente sobre la membrana [7]. Los sellos están colocados entre la MEA y las placas bipolares con el fin de evitar cualquier intercambio de combustible u oxidante entre la celda y el ambiente.

1.2.3 Fabricación de electrodos

De los dos métodos mencionados anteriormente, la única diferencia es básicamente el sustrato en donde es aplicado el electrodo ya que los materiales utilizados son esencialmente los mismos. El proceso de manufactura de los electrodos de capa delgada es descrito a continuación.

Formulación de la tinta

Los electrodos de capa delgada están basados en la fórmula general desarrollada por Wilson [6]. La tinta catalítica consiste de 4 componentes principalmente: un solvente (metanol, etanol), un ionómero (Nafion líquido), un catalizador (platino soportado sobre carbón a diferentes porcentajes) y soporte de carbono (Vulcan XC-72, nanotubos de carbono, etc.).

Muchas fórmulas de tintas han sido desarrolladas y comercializadas, pero todas contienen un aglutinante el cual usualmente es el mismo ionómero usado en la membrana.

Aplicación de la tinta

El sistema de aplicación de la tinta catalítica, puede implementarse de dos maneras: aplicación automática y aplicación manual.

La aplicación automática se hace por medio de un sistema de control numérico computarizado (CNC) con un movimiento de 1 o 2 dimensiones, adaptado con un dispositivo aerógrafo el cual aplicará de manera uniforme la tinta sobre la membrana o sobre el difusor.

Por otro lado, en la aplicación manual, la tinta catalítica es depositada sobre la membrana con una espátula de metal. En este método la solución debe estar semi-seca, como una pasta para poder ser aplicada correctamente. También puede ser aplicada con la ayuda del aerógrafo.

Prensado de la MEA

Después de la aplicación de la tinta catalítica sobre el GDL o sobre la membrana, se realiza el prensado de la membrana y los difusores mediante el proceso de prensado en caliente (hot-pressing). Este subproceso de prensado es esencial para la fabricación de ensambles.

El prensado en caliente se ha aplicado en la mayoría de los protocolos de preparación de los ensambles, se realiza intercalando la membrana entre el ánodo y el cátodo. Tres parámetros

principales tienen que ser considerados en el proceso de prensado en caliente, la temperatura, la presión, y la duración [8]. También es importante mencionar que el prensado en caliente puede conducir a la reconfiguración del ionómero (Nafion) y una utilización más favorable del catalizador en beneficio del rendimiento de la PEMFC [9]. Sin embargo, un excesivo prensado en caliente puede reducir el rendimiento de secado irreversible y dañar la MEA, a partir de temperaturas superiores a 130 °C [10]. Además, el buen funcionamiento de los ensambles depende directamente de la correcta distribución de los materiales en toda el área de trabajo, lograda por la prensa neumática de potencia. Una prensa de potencia es una máquina que provee fuerza a un molde usado para aplanar, formar o moldear materiales metálicos o no metálicos. De esta manera, una prensa es un componente de un sistema de manufactura que combina la prensa, el molde, material y método de alimentación para producir una parte.

Este trabajo se enfoca en el desarrollo de un sistema con las capacidades técnicas para la manufactura de electrodos porosos para mili stacks PEM de alta densidad de potencia, con un área de superficie en rangos de 5 – 20cm². Los electrodos deben ser prensados a una presión máxima de 100 kg/cm². La tabla 1.1 describe la relación de capacidad nominal de prensado en kg, para algunos valores de área superficial del electrodo poroso.

Tabla 1.1 Relación de fuerza equivalente en kgf y kN respecto al área superficial del electrodo

Área superficial (cm ²)	Fuerza equivalente (kgf)	Fuerza equivalente (kN)
5	500	4.9
10	1000	9.8
15	1500	14.72
20	2000	19.62

Para este proyecto, el elemento de fuerza mecánica es un pistón neumático (Festo ADNH-150) controlado por una válvula proporcional la cual regulará el paso de la presión neumática hacia el pistón para lograr un aumento paulatino de la fuerza mecánica que éste ejercerá sobre la cama térmica. Este proceso de control modulado de la presión se hace con el objeto de lograr una rampa de presión positivo-negativa. Esto se refiere a que, se requiere que el pistón pueda alcanzar hasta 18kN de fuerza con un incremento de la presión a una razón de 1bar/s aproximadamente en la fase positiva, con un descenso también controlado en la fase negativa.

Entre los retos técnicos que enfrenta este desarrollo, uno de los principales es controlar el aumento y decremento proporcional de la fuerza mecánica ejercida por el pistón sobre las placas térmicas y de la temperatura en dichas placas. El control de la fuerza se llevará a cabo regulando la presión neumática que llega al pistón, por medio de una válvula proporcional la cual será operada por un controlador lógico programable (PLC). De igual manera el PLC se hará cargo del control de la temperatura en las placas térmicas.

El alcance de esta tesis abarca los retos técnicos del diseño, construcción de la prensa y de sus periféricos; no se pretende profundizar en temas de análisis teórico de los fenómenos de transporte ocurridos en las PEMFC.

1.3 Análisis del mercado en sistemas de prensado

Uno de los principales retos al momento de diseñar un sistema de manufactura automatizado es definir la empresa que proveerá los componentes para dicho mecanismo. En México existen varias empresas que potencialmente podrían llevar a cabo el trabajo de construcción y suministro de la prensa, sin embargo, su costo es de casi US\$80, 000, lo cual no cumple con el requisito de generar un prototipo de precio relativamente bajo. Por otro lado, hay pocas marcas de fabricantes de componentes neumáticos en nuestro país, y solo unas pocas con una gama amplia de productos enfocados a la automatización de procesos.

Dentro de las consideraciones más importantes durante el diseño del sistema está la fuerza de empuje de la prensa, que puede ser producida través de un pistón neumático de dimensiones que no superen la capacidad de portabilidad; esto además de no ser tan costoso como trabajar con aceites, es mucho más limpio ya que se emplean gases a presión pues existe un riesgo de contaminación de muestras si llegasen a producirse fugas en la zona de trabajo. Estas consideraciones permitieron optar por dimensionar un sistema de actuación electro-neumático.

Para fines de la definición de los proveedores de los materiales necesarios para la construcción del prototipo, primero se identificaron las necesidades técnicas del mismo. Básicamente, se construyó un sistema que provee presión mecánica sobre un elemento específico. Para esta tarea se requiere de un actuador de fuerza con capacidades nominales suficientes para lograr los objetivos.

Tabla 1.2- Lista de proveedores de componentes electrónicos y neumáticos en México.

Nombre de la empresa	Página electrónica	Servicio que ofrece
TOX PRESSOTECHNIK	http://www.tox-sp.com/sp/productos/prensas.html	Interlocutor especialista en productos y soluciones innovadoras en el ámbito de la tecnología de unión, actuadores y prensas.
PARKER	http://www.parker-mexico.com/index.html	Parker dispone de productos en nueve tecnologías fundamentales de Movimiento y Control, que incluyen los sectores aeroespacial, de climatización, electromecánico, de filtración, de manipulación de líquidos y gases, hidráulico, neumático, de

		control de procesos y de sellado y blindaje.
SMC	http://www.smc.com.mx	Empresa dedicada a la implementación de soluciones en automatización, enfocada en gases a presión como fluido de trabajo para sus equipos.
FESTO	http://www.festo.com/cms/es-mx_mx/index.htm	Provee soluciones para los problemas en las diferentes áreas de los ramos industriales como: automotriz, alimenticia y del embalaje, farmacéutica, electrónica, química, papelería, textil, minero, entre otros,
HYDRAPOWER	http://www.hydrapower.com.mx	Desarrolla procesos de automatización con sistemas hidráulicos, neumáticos, mecánicos y electrónicos, aplicando tecnología de punta combinada.
ASHM	www.ashm.mx	Cuenta con productos de la más alta calidad para sistemas hidráulicos. Así como, una gran variedad y gran surtido de productos para fabricar, reparar y dar mantenimiento a cilindros hidráulicos y a sistemas hidráulicos en general.

Después de la revisión de los servicios que ofrecen las empresas de la Tabla 1.2, realización de entrevistas para la delimitación del proyecto y reduciendo la lista de posibles proveedores y fabricantes, se decidió que Festo era la empresa que cumplía con los requisitos, tales como: disponibilidad de componentes, garantía de calidad técnica, costo y soporte técnico.

CAPÍTULO 2

DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO

2.1 Diseño del prototipo

El diseño de este prototipo se basó en el diseño clásico de una prensa troqueladora neumática. La figura 2.1 muestra un diagrama general de esta conceptualización, con su elemento de fuerza dispuesto de manera vertical y con avance descendente del vástago. Cabe mencionar, que los modelos de prensas manuales utilizados para la manufactura de electrodos tienen generalmente un avance ascendente del vástago, colocando la pieza a trabajar en la parte móvil del equipo lo cual, en cierta forma, pudiera aumentar el margen de error al momento del prensado. Dada esta condición, se consideró una disposición descendente del elemento de fuerza. También, se diseñó una armadura de soporte robusta principalmente con el fin de reducir el riesgo de accidentes por pivoteo y caída del equipo, esto último debido a la altura final del equipo (1.25 m). Además, esta configuración permite la posibilidad de aumentar las capacidades máximas del actuador de fuerza.

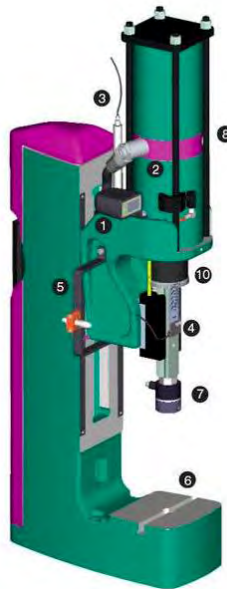


Figura 2.1. Diseño clásico de una prensa troqueladora [11].

En la figura 2.1, se describen las partes más comúnmente encontradas en una prensa troqueladora, donde, 1) es el contador con presóstato, 2) es el sensor de posición montado en el tirante del cilindro neumático, 3) es el medidor del recorrido de la carrera total de la prensa, 4) el sensor de la posición del vástago, 5) la interfaz estándar para todos los sensores eléctricos, 6) la mesa índice de accionamiento neumático, 7) el porta-punzón, 8) amortiguador ajustable en la carrera de retorno, 9) las conexiones de aire y 10) el ajustador de carrera sobre todo el recorrido.

Todo el diseño del prototipo se llevó a cabo en la interfaz de SolidWorks 2014. Los bloques de los componentes electro-neumáticos (en formato SLDPRT) se obtuvieron a través del sitio web de Festo directamente, los cuales a su vez fueron dibujados con medidas a escala precisas facilitando así el trazado de la estructura de soporte y el desarrollo del ensamble en formato digital. El sistema de soporte consta de 3 placas de acero negro A36 denominadas placa inferior, intermedia y superior; las placas superior e intermedia sirven para sujetar al cilindro neumático, mientras que la inferior sirve de anclaje para el sistema de prensado y de las partes inferiores del sistema térmico. El complemento superior del sistema térmico se fija en el extremo roscado del vástago del cilindro neumático ADN-150.

2.2 Estudio de esfuerzos mecánicos

Este estudio se realizó en su totalidad con la extensión denominada *SolidWorks Simulation*, realizando el diseño de la armadura de soporte con el objetivo de asegurar que el sistema no presentará fallas relacionadas con la fatiga de los materiales durante el ciclo de fuerza. Por otro lado, se definieron como condiciones de frontera, que la base de la prensa (placa inferior) es fija y no tiene movimiento en ninguno de los tres ejes y el resto de las piezas sólo presentarán movimiento en el eje vertical, además, existe una carga aplicada a la superficie superior del módulo térmico, también sobre el eje vertical. Adicionalmente se realizaron cálculos de distribución de esfuerzos mecánicos que permitieron referenciar los resultados de la simulación en SolidWorks.

2.2.1 Armadura de soporte

Para que el sistema neumático pueda hacer las funciones de prensa, el cilindro neumático debe estar fijado a una armadura que aparte de servir como solución para el posicionamiento del pistón y las placas de calentamiento, sea esencialmente un soporte mecánico que absorba las fuerzas de reacción que el pistón produce cuando está en la fase de compresión.

El esfuerzo mecánico sufrido por los soportes es generado por el pistón neumático, por lo que el análisis debe iniciar desde este punto. Cuando la prensa se encuentra en la fase de fuerza máxima del ciclo de trabajo, el vástago del pistón neumático transmite una fuerza de compresión equivalente a 18,281 N (1.8 Ton aproximadamente).

La ecuación para obtener la presión ejercida por el pistón en la punta del vástago es:

$$P_v = \frac{F_p}{A_v} \quad (1)$$

Donde P_v es la presión en el extremo del vástago (MPa), F_p es la fuerza máxima nominal del cilindro neumático (18,281 N) y A_v es el área de sección transversal del vástago. El diámetro del vástago es de 25 mm, por tanto, el área de sección es de $4.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.

Entonces

$$P_v = \frac{18,281 \text{ N}}{4.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 37.2418 \text{ MPa} \quad (2)$$

Teóricamente la fuerza ejercida en un extremo del pistón deberá ser igual a la fuerza en el otro extremo, sin embargo, en la cara opuesta al vástago el área de la sección es mayor. El croquis de la figura 2.2 describe las medidas de las aristas correspondientes a la sección transversal del pistón.

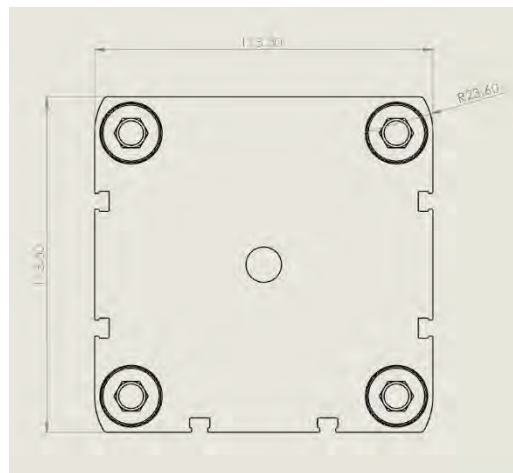


Figura 2.2. Medida de aristas de la cara superior del pistón neumático en milímetros.

De acuerdo a la figura 2.2 la forma de la cara del pistón no es estrictamente cuadrada. Sin embargo, para fines prácticos será considerado un cuadrado. Si establecemos el área de la cara del pistón como 12882.25 mm^2 , entonces:

$$P_{piston} = \frac{18,281 N}{12882.25 mm^2} = 1.42 MPa \quad (3)$$

Dónde 18, 282 N es la fuerza ejercida por la cara superior del pistón

Este esfuerzo de compresión aplicado por el vástago se proyecta directamente hacia la tapa trasera del cuerpo del pistón, la cual está fijada a una placa de acero negro A36 (placa superior) que soporta cuatro varillas roscadas de acero inoxidable T304, las cuales a su vez están fijadas a la placa intermedia donde se posa el pistón. La figura 2.3 describe los diagramas de las tres placas que conforman la armadura de soporte. Como efecto de reacción, el cuerpo del pistón tenderá a ir en dirección opuesta al movimiento del vástago al momento que éste último no pueda seguir avanzando, pero la presión dentro del pistón sigue aumentando. Cuando esto suceda, la placa superior (A) absorberá el esfuerzo producido por el cuerpo del pistón hacia las 4 varillas fijadas en las esquinas, provocando un esfuerzo tensionante en las varillas de soporte. Al suceder esto, la fuerza recibida por la placa teóricamente se dividirá uniformemente entre el número de soportes.

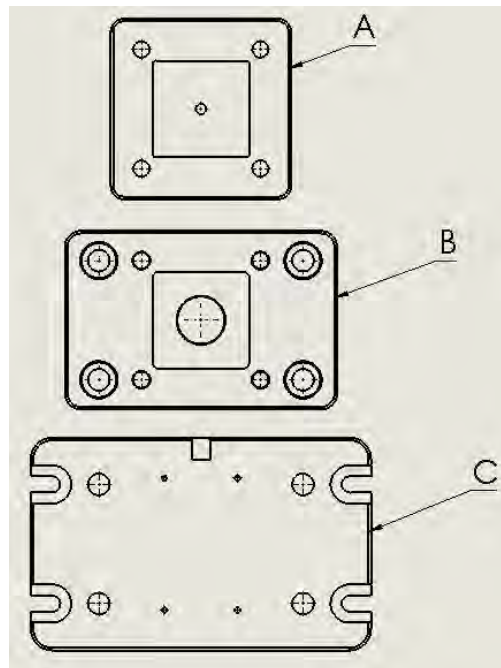


Figura 2.3. Caras posteriores de las placas A) superior, B) intermedia e C) inferior.

Este ciclo de esfuerzos se repite de manera análoga en la segunda sección de la prensa, la cual comprende esfuerzos tensionantes a partir de la placa intermedia respecto a la placa inferior, la

cual es el punto fijo de referencia de todo el sistema, ya que es la pieza que mantiene todos los componentes de la prensa en su lugar.

Las varillas son espárragos sinfín de acero inoxidable T304 con un diámetro (θ) de 0.75 in para el caso de las varillas superiores y de $\Theta = 1 \text{ in}$ para las inferiores, ambas con rosca estándar. Para el caso de las varillas superiores, estarán fijas entre las placas superior e intermedia por medio de tuercas tipo castillo y rondanas de presión, atrapando el pistón entre las placas.

Para el caso de las fuerzas ejercidas en la placa de soporte superior, se obtuvo el centro de masa del área de la cara superior del pistón para definir un solo punto de aplicación de fuerza; dicha fuerza se distribuye equitativamente entre los 4 puntos de soporte donde las varillas roscadas absorberán el esfuerzo generado. Dado que el sistema se considera en equilibrio, la suma de todos los vectores de momento externos que actúan en el sistema son igual a cero [12]

Sin embargo, existe un esfuerzo flexionante generado desde el centroide de la placa superior hasta cada uno de puntos de apoyo. Este puede ser representado en dos dimensiones como se describe en el diagrama de la figura 2.4.



Figura 2.4. Diagrama de vectores fuerza sufridos por la armadura de soporte durante el ciclo de fuerza.

Bajo este entendido, la fuerza producida por el pistón, distribuida en los cuatro puntos hará que la fuerza en cada varilla sea de la forma:

$$F_{Va} = \frac{F_p}{n} = \frac{18,281 N}{4} = 4,570.25 N \quad (4)$$

Donde F_p es la fuerza máxima nominal del cilindro y n es el número de puntos de apoyo uniformemente distribuidos.

2.3 Simulación computarizada de esfuerzos mecánicos

Como se mencionó anteriormente, se utilizó la extensión SolidWorks Simulation para llevar a cabo el diseño de la estructura de soporte, utilizando los valores calculados anteriormente para definir las condiciones de frontera. Para iniciar el estudio, se definieron las propiedades físicas de los materiales utilizados en la construcción de la armadura de soporte, Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Lista de materiales usados en la construcción de la armadura de soporte y el módulo térmico.

Material	Propiedades		Componentes
Acero AISI T304	Tipo de modelo:	Lineal elástico isotrópico	Cartucho térmico, varilla roscada superior, varilla roscada inferior
	Criterio de falla:	Tensión máxima de von Mises	
	Límite elástico:	206.807 N/mm ² (MPa)	
	Conductividad térmica:	16 W/(mK)	
	Calor específico:	500 J/(kgK)	
	Densidad:	8000 kg/m ³	
Duraluminio A-7075 T6	Tipo de modelo:	Lineal elástico isotrópico	Placa térmica
	Criterio de falla:	Estrés Max von Mises	
	Límite elástico:	450 N/mm ² (MPa)	
	Conductividad térmica:	134 W/(mK)	
	Calor específico:	915 J/(kgK)	
	Densidad:	2800 kg/m ³	
Acero ASTM A36	Tipo de modelo:	Lineal elástico isotrópico	Placa Inferior, placa Intermedia, Placa Superior
	Criterio de falla:	Tensión máxima de von Mises	
	Límite elástico:	400 N/mm ² (MPa)	
	Conductividad térmica:	58 W/(mK)	
	Calor específico:	460 J/(kgK)	
	Densidad:	7850 kg/m ³	

El sistema de esfuerzos puede interpretarse como un ciclo cerrado de esfuerzos, ya que las fuerzas de reacción son absorbidas por la armadura que soporta al pistón. El estudio se realizó analizando cada pieza individualmente al igual que todo el ensamble, de manera que se obtenga una idea más clara de los esfuerzos involucrados en el proceso de prensado.

2.3.1 Resultados del estudio

La concentración de esfuerzos representa un reto al momento de diseñar cada uno de los elementos que integran una prensa, se deben considerar geometrías, placas, varillas, barrenos, entre otros. Es importante al momento de diseñar, minimizar la concentración de esfuerzos porque la exposición de los materiales a estos fenómenos puede producir plasticidad del material, provocar rotura y si se presentan cargas repetidas se puede acelerar el proceso de fatiga. Además, todos estos factores a largo plazo pueden reducir la capacidad de transferir las cargas aplicadas. En ese sentido, para determinar los valores de esfuerzos en cada elemento, se utilizó el teorema de tensión de von Mises que es una cantidad de tensión calculada a partir de los componentes de la tensión. Aunque una tensión de von Mises en un nodo no define exclusivamente el estado de tensión en ese nodo, proporciona información adecuada para evaluar la seguridad del diseño para múltiples materiales dúctiles [13].

La tensión de von Mises se calcula a partir de los seis componentes de tensión, de la siguiente manera:

$$VON = \{0.5 [(\sigma_x + \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Donde σ_x , σ_y , y σ_z son los esfuerzos normales de cada componente, τ_{xy} es el esfuerzo cortante en el plano x , en la dirección y , τ_{xz} es el esfuerzo cortante en el plano x , en la dirección z y τ_{yz} es el esfuerzo cortante en el plano y en dirección z .

O en forma equivalente, a partir de las tres tensiones principales,

$$VON = \{0.5[(P1 - P2)^2 + (P1 - P3)^2 + (P2 - P3)^2]\}^{(1/2)} \quad (6)$$

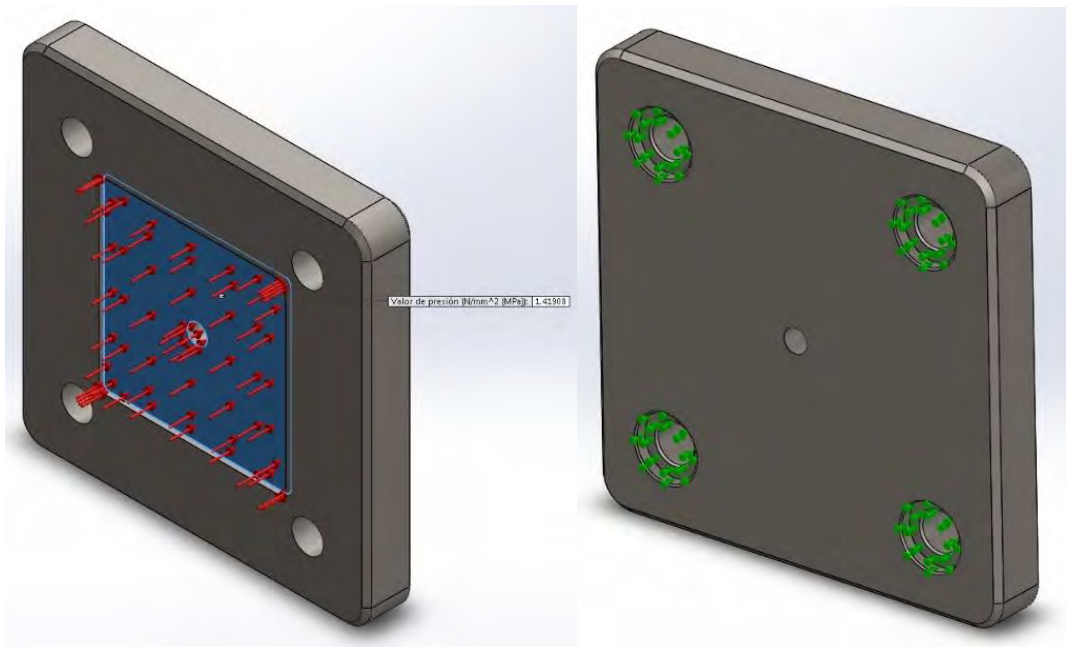
Donde P1 es la primera tensión principal (la mayor), P2 es la segunda tensión principal y P3 la tercera. Los componentes de la tensión dependen de las direcciones en que se calculan. En el caso de ciertas rotaciones de ejes de coordenadas, las tensiones cortantes desaparecen. Los tres componentes de tensión normal restantes se llaman tensiones principales. Las direcciones

asociadas con las tensiones principales se llaman direcciones principales. La diferencia entre la primera tensión y la tercera (P1-P3), se le llama también intensidad de tensión.

A diferencia de los componentes de la tensión, la tensión de von Mises (VON) no tiene dirección. Está completamente definida por la magnitud con unidades de tensión. La tensión de von Mises es utilizada por el criterio de fallos para evaluar los errores en los materiales dúctiles [13].

Placa superior

Es una placa plana de acero ASTM A36 de espesor constante con cuatro barrenos de 0.75 in (19.05 mm) distribuidos simétricamente en las esquinas y uno más en el centro de 0.5 in (12.7 mm). La carga se aplica proporcionalmente en toda la sección superior y se realizó el análisis de la concentración de esfuerzos estáticos de la placa superior mediante el teorema de Von Mises. Los resultados se muestran a continuación.



a)

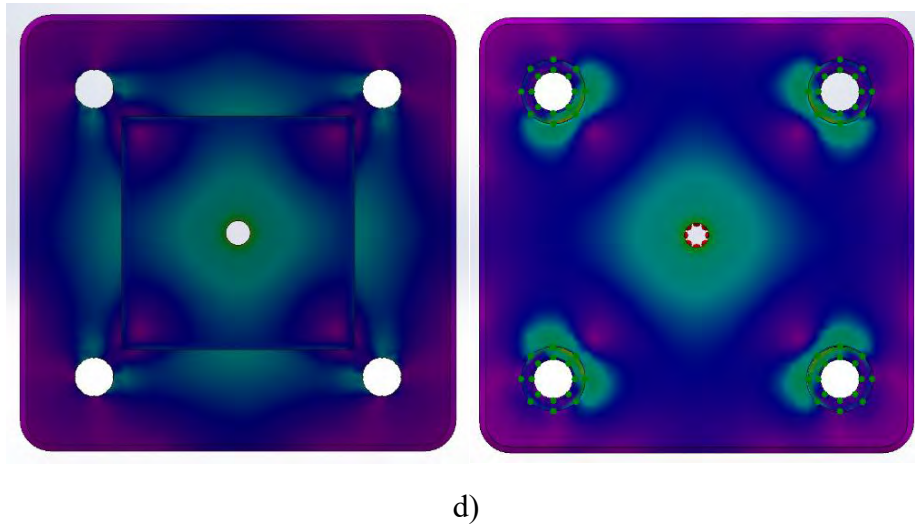


Figura 2.5 a) Región de aplicación de la presión del pistón, b) puntos de fijación de la placa, c y d) resultados de la simulación de esfuerzos.

En la imagen 2.5 a y b, se describen las condiciones de frontera de la placa superior y algunos resultados de la simulación. En la imagen 2.5a, las flechas rojas denotan la región donde se ejerce una presión de 4.92 MPa y en 2.5b, los nodos verdes en los cuatro barrenos, denotan inmovilidad en los 3 ejes. Los planos de esta placa están incluidos en el anexo 1-Plano 1.

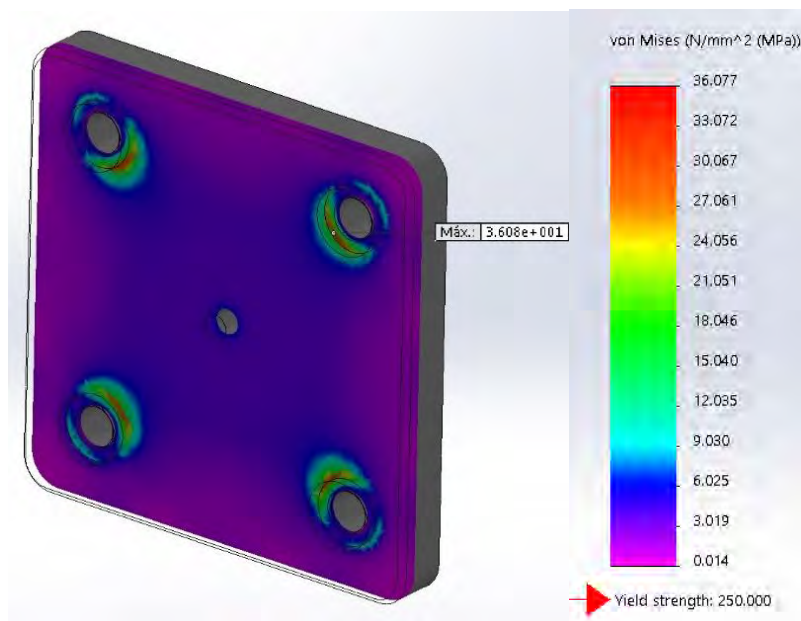


Figura 2.6. corte de sección de placa superior donde se muestra regiones de esfuerzo máximo y la escala de magnitudes.

Como resultado del estudio de esfuerzos en la placa superior se obtuvo que el esfuerzo máximo se presenta en la región interna de los barrenos que albergan a las varillas. Este comportamiento era el esperado debido a que el momento flexionante generado cuando el cuerpo del pistón empuja, se proyecta directamente hacia esa región de la placa. Aun así, el esfuerzo máximo fue de 36.07 MPa de presión en los barrenos y considerando que el límite de tracción del material es de 250 MPa se puede considerar este un valor aceptable.

Placa intermedia

La placa intermedia es una placa de acero ASTM 36 de espesor constante con 9 barrenos, 4 de 0.75 in (19.05mm) distribuidos especularmente de la misma manera que la placa superior, 4 barrenos más de 1 in (25.4mm) de diámetro, distribuidos simétricamente uno en cada esquina de la placa y un barreno central de 2.2 in (55.5 mm) el cual recibe la base del cilindro de fuerza. Los planos de esta pieza están en el anexo 1-Plano 2.

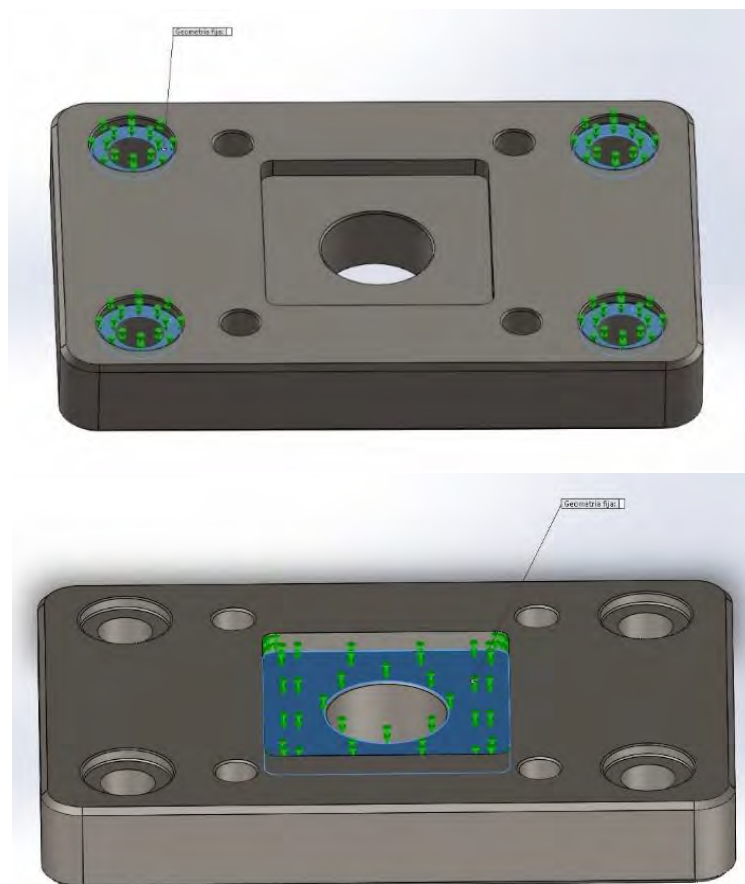


Figura 2.7. Distribución de geometrías fijas en la placa intermedia.

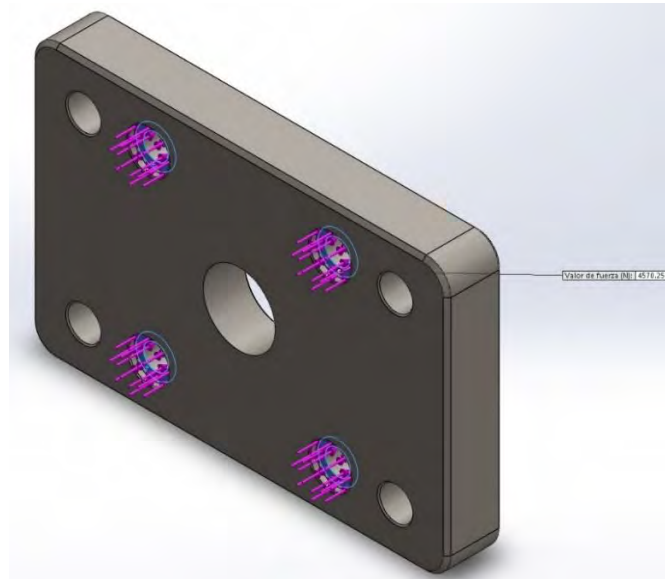
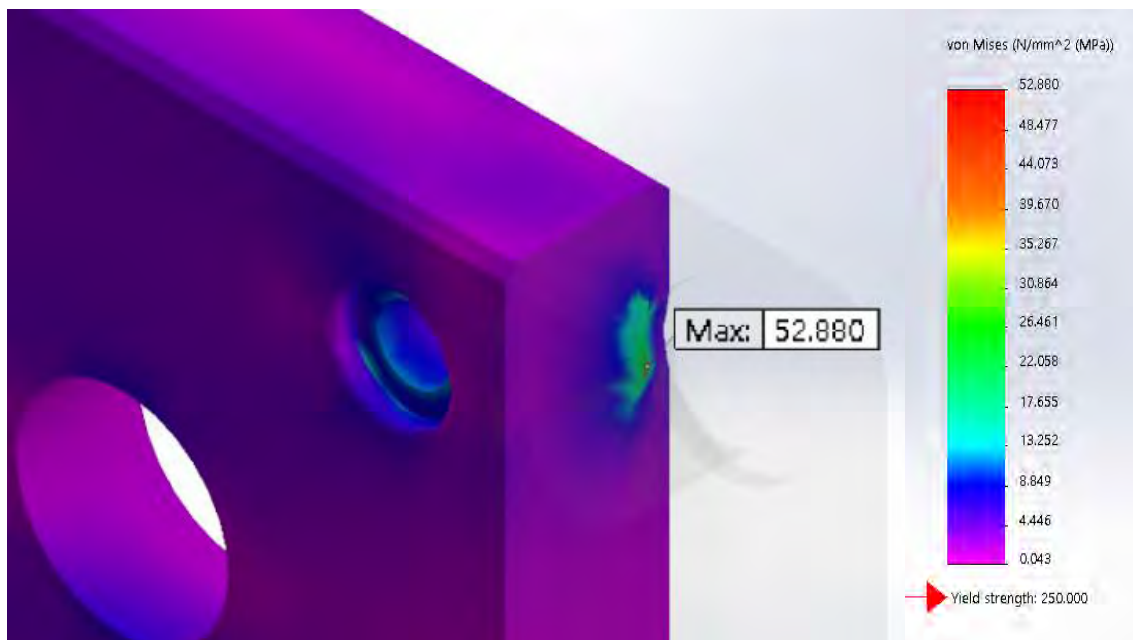


Figura 2.8. Puntos de aplicación de fuerza ($4570.25 \text{ N} \times 4$) en la placa intermedia

Las imágenes de la figura 2.7 describen las regiones donde se definieron las geometrías fijas para llevar a cabo el estudio. Además, la figura 2.8, muestra los 4 puntos de aplicación de fuerza, la cual representa la fuerza de reacción de la placa superior, a cada punto se le aplicó una fuerza de 4750.25 N .



a)

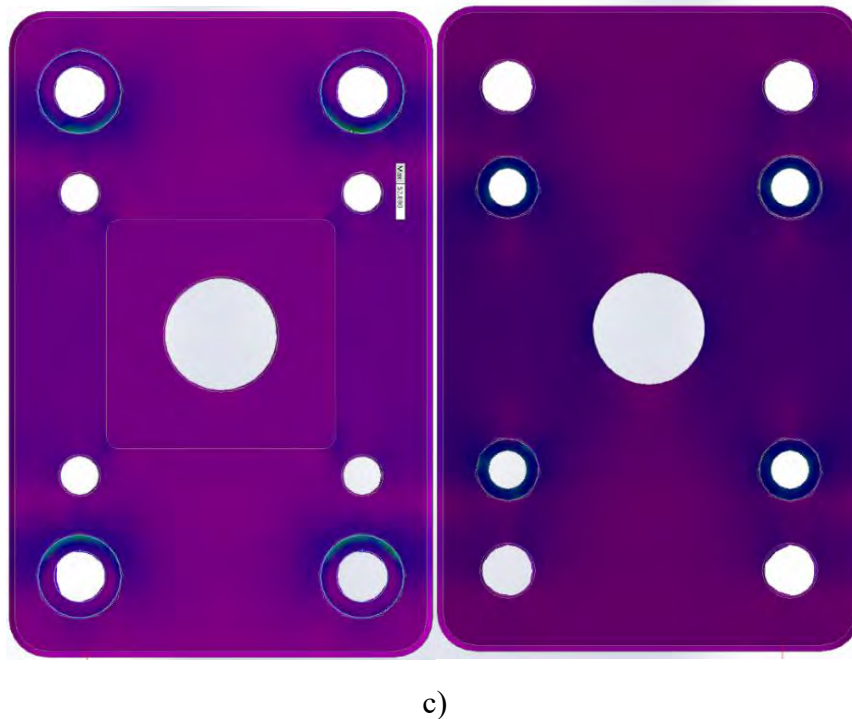


Figura 2.9. Resultado del estudio estático de la placa intermedia mediante el teorema de von Mises

En la figura 2.9c, es posible observar que la distribución de los esfuerzos se encuentra igualmente orientada hacia la parte interna de la pieza. La figura 2.9a muestra que, en los barrenos más alejados del centro de la misma, los cuales albergan a las varillas inferiores, se encuentra el esfuerzo máximo de 52.88 MPa, Aun así, los valores se mantienen muy alejados del límite de tracción, la figura 2.9b muestra la gráfica de elemento finito, donde se observa que en general la pieza sufre esfuerzos con una magnitud generalizada en rangos de 0.04 – 8 MPa.

Placa inferior y módulo térmico

Para el caso de la placa inferior, se llevó a cabo el análisis en conjunto con el módulo térmico, ya que es éste último el que en realidad recibirá directamente la compresión del cilindro neumático y transferirá el esfuerzo generado hacia la placa inferior. La Tabla 2.4 describe los resultados de dicho análisis.

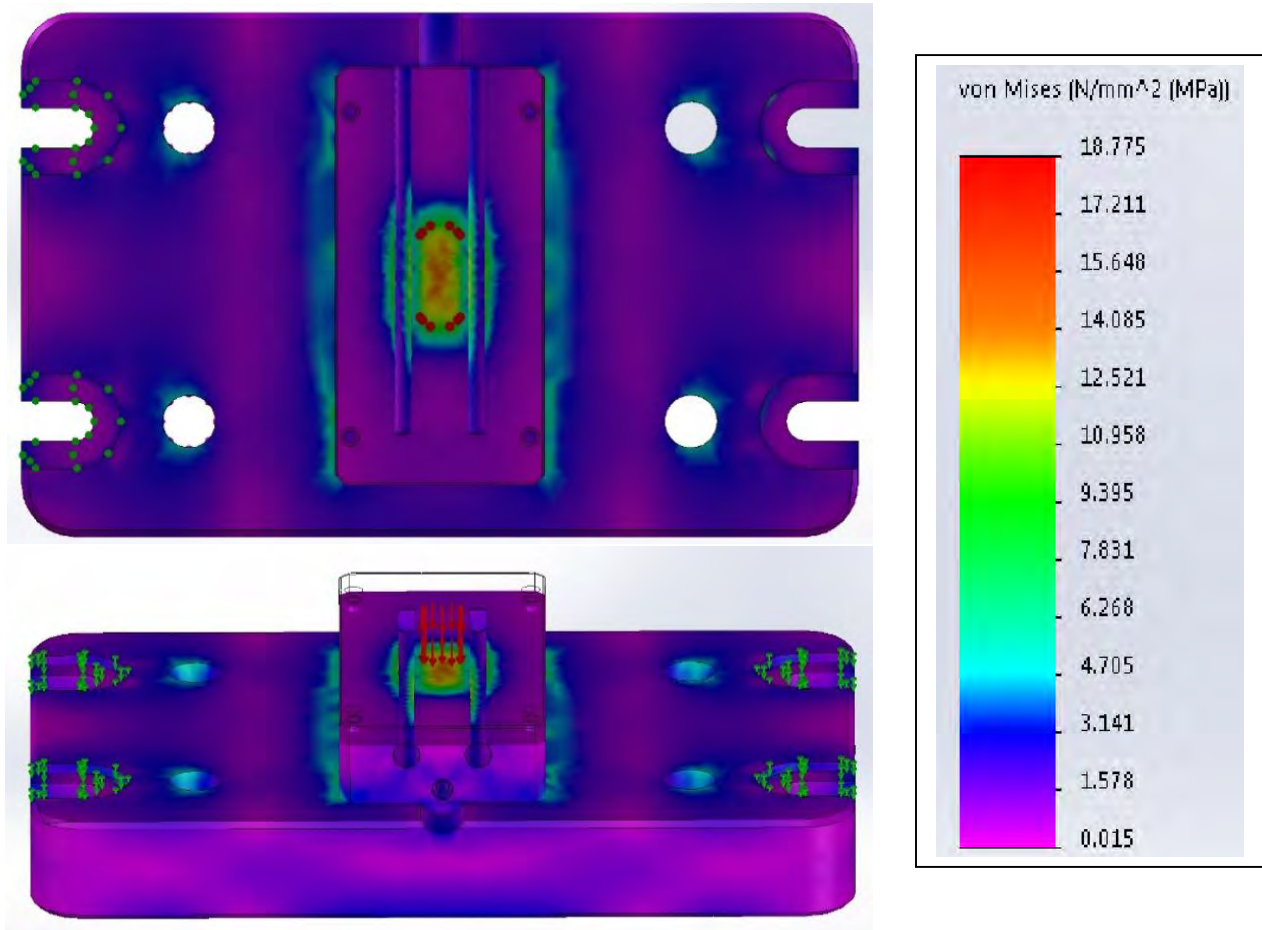


Figura 2.10. Análisis estático del sistema térmico / Placa Inferior Tensiones de Von Mises

La figura 2.10 muestra dos caras del módulo térmico y la gráfica de elemento finito. Se definieron geometrías fijas en los cuatro soportes “ojo de chino” de la placa inferior, las cuales simulan la sujeción a la mesa de trabajo. Además, se aplicó una presión de 18.28 MPa sobre la placa térmica y una carga de reacción de 4570N en la parte inferior de cada uno de los cuatro barrenos que albergan las varillas inferiores.

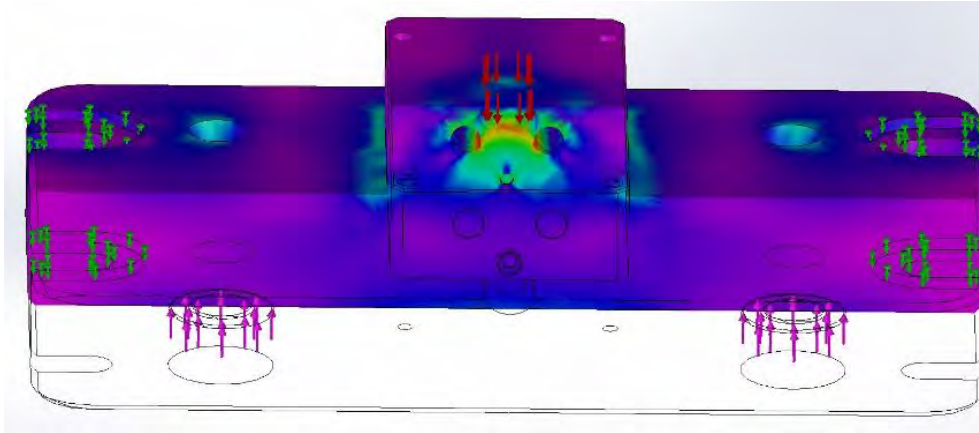


Figura 2.11. Corte de sección del módulo térmico, donde se muestra la zona de prensado.

En los resultados del estudio, se obtuvieron valores de esfuerzo máximo de 18.78 MPa y mínimo de 0.015 MPa. la figura 2.11 muestra un corte de sección como se logra apreciar que la región central de la placa térmica es la que más absorbe la presión ejercida por el pistón. Este resultado es coherente debido a que es en la superficie del centro de la placa donde se llevará a cabo el prensado de los electrodos a fabricar. Sin embargo, el esfuerzo máximo fue relativamente bajo respecto al límite elástico del material duraluminio A-7075 que es de 450 N/mm^2 (MPa).

Varilla roscada superior

A continuación, se describen los resultados del estudio de esfuerzos en la varilla superior. Cabe mencionar que este esfuerzo se representa en cada una de las 4 varillas que conforman el armazón superior de la armadura de soporte. Las condiciones de frontera se definieron como lo describe la figura 2.12, con una geometría fija en la parte inferior de la varilla, y una carga a tensión de 4570 N en el extremo superior, simulando la tensión generada por la acción del cilindro de fuerza. Para fines prácticos se consideró la varilla lisa, es decir, sin roscado.

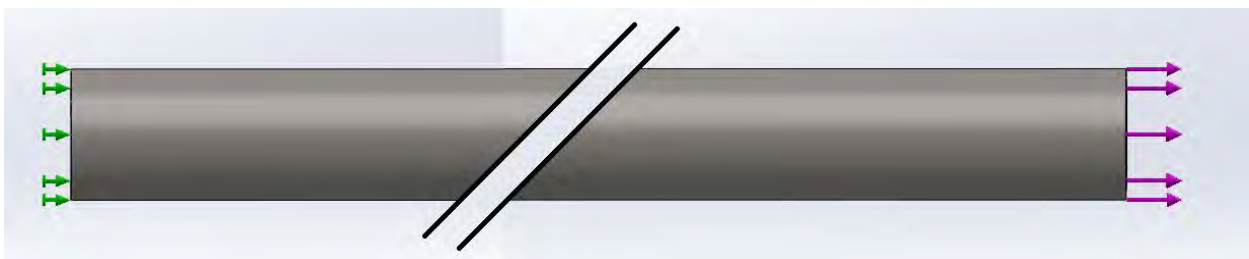


Figura 2.12. Vista lateral de los extremos de la varilla superior y de las cargas que actúan sobre ella.

En este análisis se observa una distribución de los esfuerzos prácticamente uniforme a lo largo de la pieza, con la excepción de la región inferior, la cual está anclada a la placa intermedia, que presenta la mayor variación de esfuerzos, incluyendo máximo y mínimo. La figura 2.13, describe un corte de sección en la región inferior de la varilla, donde el esfuerzo máximo es de 18.9 MPa, que representaría el 10% del límite elástico permisible.

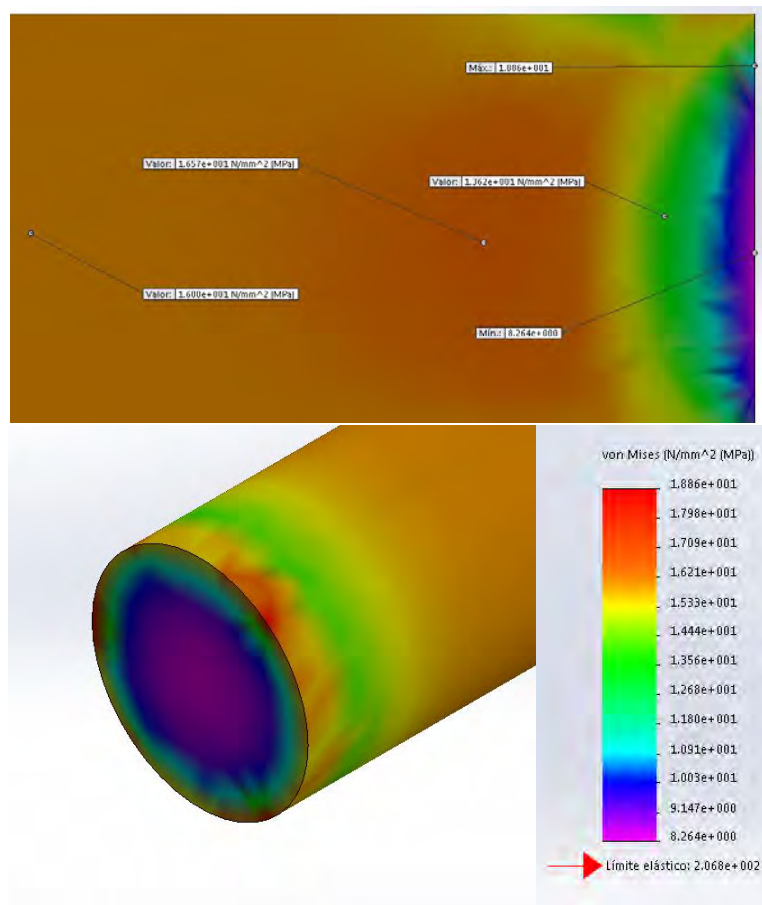


Figura 2.13. Resultados del estudio estático de esfuerzos, obteniendo tensiones de Von Mises.

Varilla roscada inferior

Para el caso de las varillas inferiores, los esfuerzos son aún menores ya que la placa intermedia absorbe parte de la energía que transfieren las varillas superiores. En la Tabla 2.6 se muestran los resultados de la simulación y, aunque de igual forma se muestra una homogeneidad a lo largo de la pieza. Es importante mencionar, que se presentó una excepción en la parte inferior, la cual es considerada como punto fijo de referencia y que sufre la transición de los esfuerzos de mínimo a máximo.

2.4 Módulo térmico

En el proceso de formación micro-estructural de los electrodos porosos, es necesario aumentar la temperatura durante el proceso de compresión. Para esto, es necesario suministrar calor mediante dos resistencias eléctricas tipo cartucho Backer Alpe de 300 W a 120 V de CA cada una, lo que resulta en un sistema electro resistivo de 600 W. Cada cartucho mide 9.525 mm (3/8") de diámetro por 152 mm (6 in). Este sistema, está instalado dentro de una placa de acero inoxidable T304 de 100 mm de ancho por 200 mm de largo por 30 mm de espesor. Los elementos térmicos están distribuidos uniformemente con una separación de 22.5 mm del centro de la circunferencia de cada sección transversal. La descripción de cada una de las partes que integran el cartucho térmico se muestra en la figura 2.5.

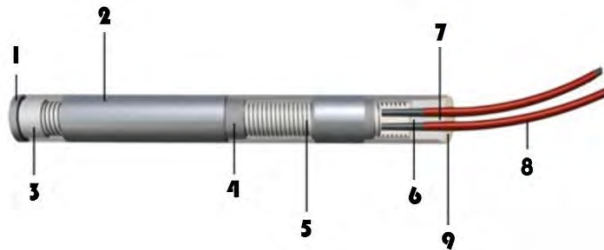


Figura 2.14. Descripción de las partes que componen los cartuchos térmicos

La figura 2.14 describe al cartucho térmico el cual está compuesto de: 1) base soldada con TIG, 2) acero inoxidable AISI 304/326/321, 3) disco cerámico de aislamiento, 4) óxido de magnesio puro de granulometría controlada, 5) hilo calefactor níquel-cromo 80/20, 6) núcleo cerámico, 7) cabezal cerámico duro, 8) cable conductor y 9) pasta dura refractaria.

Inicialmente, el valor máximo de temperatura es ingresado al conjunto de valores consigna que recibe el controlador lógico programable (PLC). Este, a través de un sensor de temperatura tipo RTD marca Efecter 600® modelo TT-100KFED06 (comúnmente conocida como PT-100), un relevador de estado sólido y mediante el controlador Festo modelo CPX-CEC comparará la señal de salida del sensor, con la temperatura del valor consigna y mandará una señal a la fuente de potencia. Las dos termo-resistencias aumentarán su temperatura de manera uniforme, recibiendo la potencia de la fuente de acuerdo a la temperatura sensada por la RTD PT-100. Al estar en contacto los elementos térmicos con el acero, éste se calentará a una razón determinada por su coeficiente de transferencia de calor. En este sentido, la extensión de simulación requiere el valor de resistencia térmica del medio que une dichas piezas.

Como dato de entrada al software se definen las resistencias térmicas. Estas resistencias están definidas por la analogía de los fenómenos térmicos y la resistencia eléctrica. La resistencia

térmica a la conducción (R_k) y convección (R_h) puede ser definida por las ecuaciones 7 y 8, respectivamente:

$$R_k = L/KA \quad (7)$$

$$R_h = 1/h_c A \quad (8)$$

Donde k es la conductividad térmica de los sólidos, h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección en la interacción sólido-fluido y A es el área de intercambio [14].

Es importante mencionar que estas resistencias simplifican el estudio analítico de los fenómenos. Las ecuaciones 9 y 10 muestran la sustitución de estas ecuaciones en la ley de Fourier y la ley de enfriamiento de Newton, respectivamente,

$$Q = 1/R_k \cdot \Delta T \quad (9)$$

$$Q = 1/R_h \cdot \Delta T \quad (10)$$

Donde Q es la velocidad de flujo de energía y ΔT es la diferencia de temperatura a lo largo de la interfaz.

Cuando existen fenómenos en serie, de manera analítica estas resistencias pueden ser sumadas para obtener una resistencia total.

$$R_t = R_k + R_h \quad (11)$$

En este trabajo se consideró de $R_t = 5.26 \times 10^4 \text{ (K}\cdot\text{m}^2) / \text{W}$ para el contacto entre las placas superior y térmica y una $R_t = 2.7 \times 10^6 \text{ (K}\cdot\text{m}^2) / \text{W}$ para el contacto entre los cartuchos térmicos y el módulo térmico. Estos corresponden a la interacción de contacto térmico entre sólido-sólido para el acero y el aluminio [13]. El coeficiente k de cada material vienen definido en la ficha técnica del software.

Los retos de este componente recaen en una buena transmisión del calor y una buena disipación del mismo. En otras palabras, se requiere que la temperatura de la placa de calentamiento aumente y se disipe relativamente rápido, quedando lista lo más pronto posible para iniciar un nuevo ciclo.

El ciclo de calentamiento debe estar sincronizado con el ciclo de presión, de manera que el primero inicie en una etapa específica del prensado. Este retraso o adelanto del inicio del ciclo de calentamiento permite mayor versatilidad a la hora de prensar, ya que se podrá definir el inicio del calentamiento de acuerdo a la fase de compresión y la razón de incremento, y viceversa.

Para solucionar estos retos, se realizó una simulación con las condiciones de frontera del dispositivo en SolidWorks. Se desprecian los valores de transferencia de calor por radiación, ya que el proceso más significativo en este sistema es conducción y convección térmica.

Para el diseño del módulo térmico se definieron condiciones de frontera de flujo de energía, la temperatura ambiente, los coeficientes de conductividad, la resistencia térmica como fuente y condiciones convectivas con el objetivo de definir un escenario en estado estático, lo más cercano a la realidad de trabajo.

2.4.1 Diseño, modelado y simulación del módulo

El módulo térmico consiste en una placa de acero inoxidable T304 barrenada para albergar 2 termo-resistencias de tipo cartucho de 300 W cada una y el sensor de temperatura PT100, el cual se encuentra a 15 mm de la fuente de calor, a la misma distancia que los elementos resistivos de la superficie superior de dicha placa. La figura 2.6 muestra el diagrama de la placa y sus dimensiones.

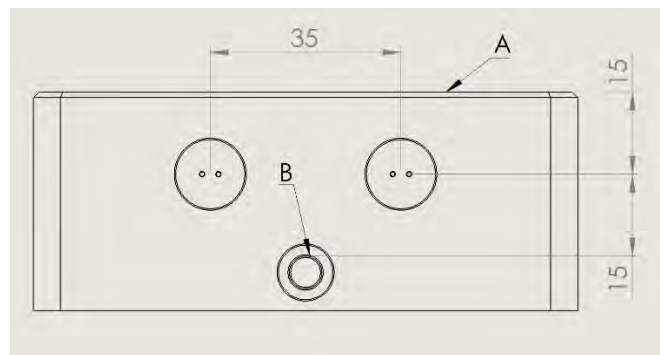
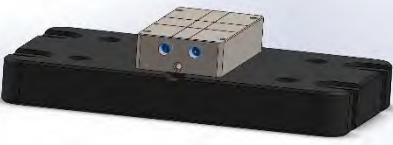
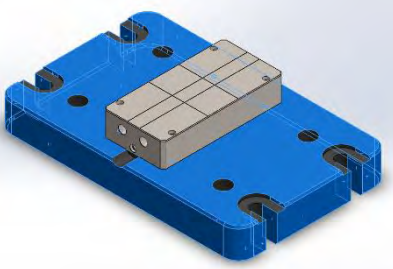
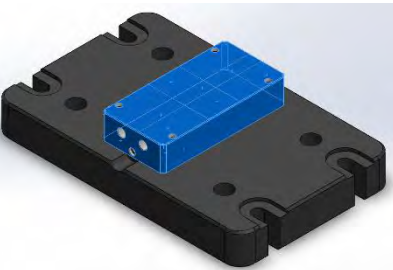


Figura 2.15. Diagrama del módulo térmico, donde A) indica la superficie superior de la placa y B) la superficie superior del sensor PT-100, ambos a la misma distancia en milímetros en sentido vertical de la fuente de calor.

Para llevar a cabo el estudio térmico estático del sistema de calentamiento, se deben obtener los valores de las propiedades térmicas del material del que está compuesta la placa térmica, además de los valores de temperatura ambiente y coeficientes de convección de la envolvente. La temperatura ambiente del estudio se consideró constante a 25 °C (298.15 K) y el coeficiente de convección para este caso, se consideró de 5 - 25 W/m² K, que es el valor máximo para una

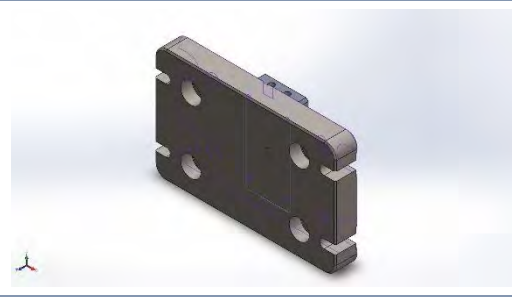
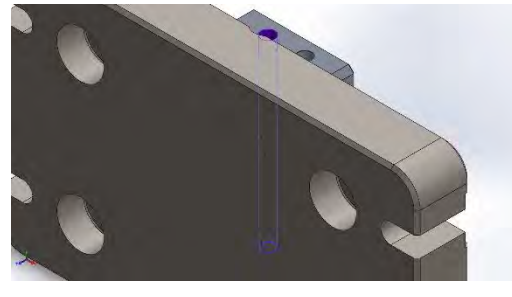
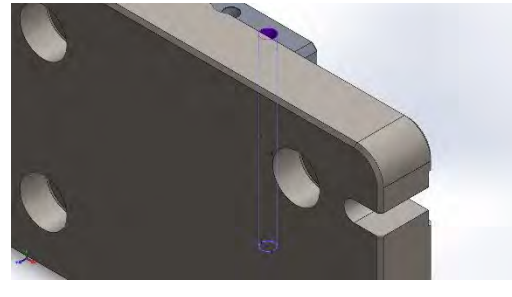
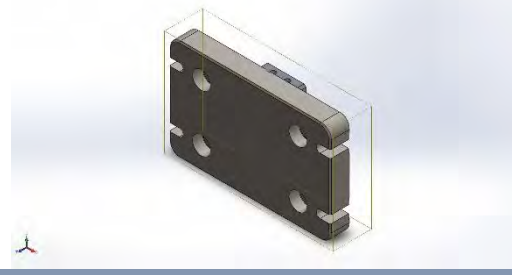
envolvente de aire estático a temperatura ambiente [14]. La Tabla 2.8, describe los elementos que están en contacto con la envolvente y el coeficiente de convección natural los cuales son considerados para este estudio. Todas las aristas y cortes que estén en contacto con el aire son también incluidas, ya que la temperatura máxima del sistema depende de que tanto se disipe el calor generado al ambiente.

Tabla 2.2. Definición de valores de potencia calorífica y coeficientes de convección para los componentes

Nombre de carga	Imagen	Detalles de la carga térmica
Potencia calorífica-1		Entidades: 2 componentes Valor de potencia calorífica: 350 W
Convección-1: placa inferior		Entidades: 52 caras Coeficiente de convección: 25 W/(m ² .K) Variación de tiempo: Off Variación de temperatura: Off Temperatura ambiente: 298.15 K Variación de tiempo: Off
Convección-2: placa térmica		Entidades: 22 caras Coeficiente de convección: 25 W/(m ² .K) Variación de tiempo: Off Variación de temperatura: Off Temperatura ambiente: 298.15 K Variación de tiempo: Off

En la Tabla 2.2 se describen los contactos entre los componentes del módulo térmico, estos transfieren la temperatura por conducción entre sí desde la fuente de calor que son los cartuchos térmicos (ver figura 2.5) hasta la placa inferior, pasando por la placa térmica.

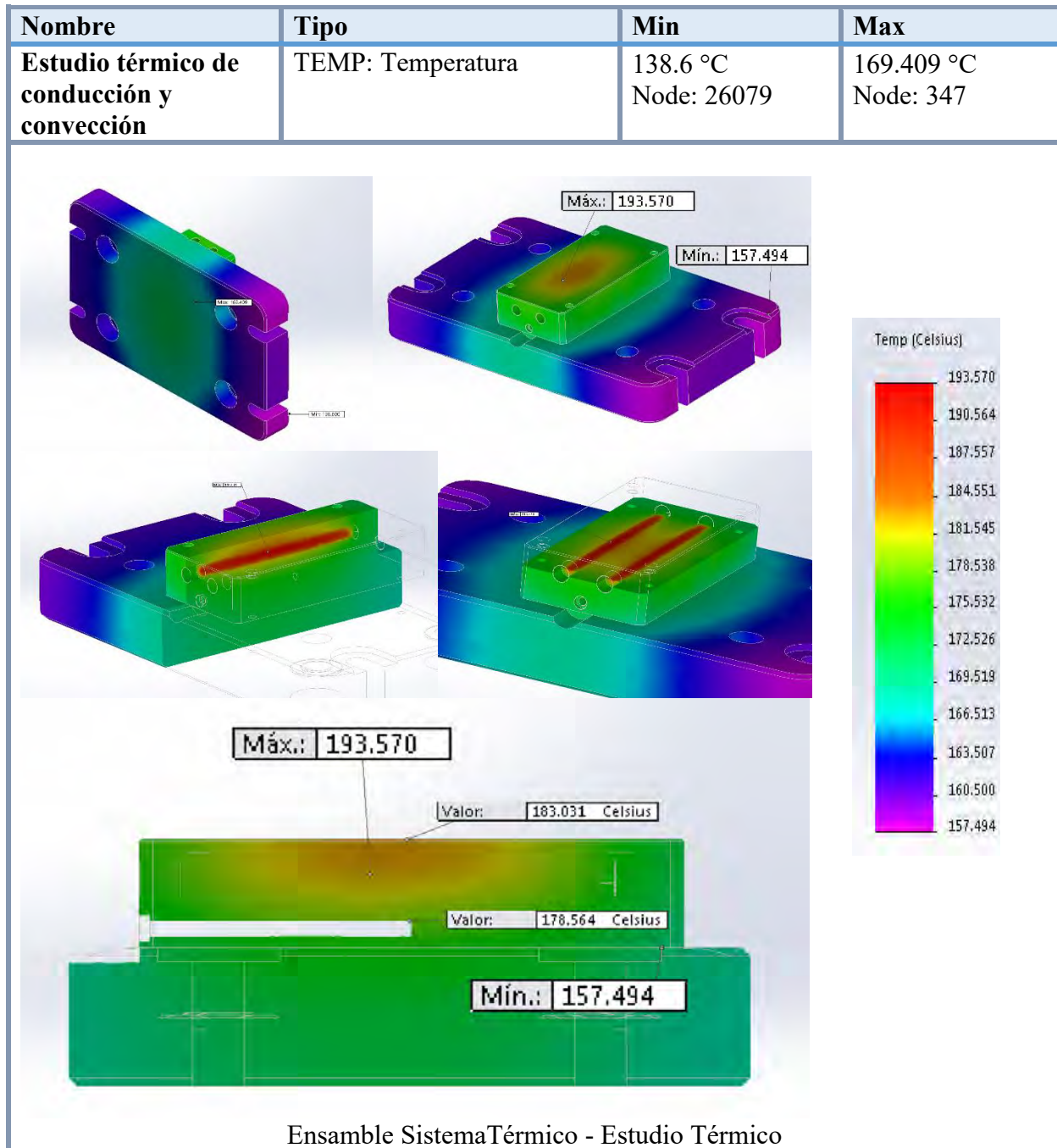
Tabla 2.3. Descripción de los contactos entre componentes y sus coeficientes de resistencia térmica (R)

Contacto	Imagen de Contacto	Propiedades del contacto	
Contacto-1		Tipo: Entidades: Resistencia térmica: Avanzado:	Resistencia térmica 2 caras 0.000526 (K·m²)/W Nodo a superficie
Contacto-2		Tipo: Entidades: Valor de resistencia térmica total: Avanzado:	Resistencia térmica 6 caras 2.7 x 10⁶ (K·m²)/W Nodo a superficie
Contacto-3		Tipo: Entidades: Valor de resistencia térmica total: Avanzado:	Resistencia térmica 6 caras 2.7x10⁻⁶ (K·m²)/W Nodo a superficie
Contacto global		Tipo: Componentes: Opciones:	Unido 1 componente Malla compatible

La Tabla 2.3 muestra los resultados del estudio térmico, se puede observar que a máxima potencia se establece una diferencia de temperatura entre la superficie de la placa térmica y el sensor PT100,

la cual alcanza los 5.5 °C. Aunque el error entre el sensor y la placa es relativamente pequeño, es importante considerar esta variación al momento de ingresar los valores consigna en el controlador, para asegurar resultados adecuados en el calentamiento de la placa.

Tabla 2.4. Resultados del estudio de transferencia de calor del módulo térmico y placa inferior



La figura 2.16a muestra la variación de temperatura a lo largo de la placa; desde la punta del sensor hacia la base. Las magnitudes de las temperaturas disminuyen a una razón semi-parabólica, como se observa en la figura 2.16b. Esto restringe en cierta forma el tamaño de los elementos a prensar sobre la placa, ya que, de superarse el tamaño previsto, habrá una distribución no uniforme de la temperatura a lo largo de la pieza, lo que resultaría en un electrodo defectuoso.

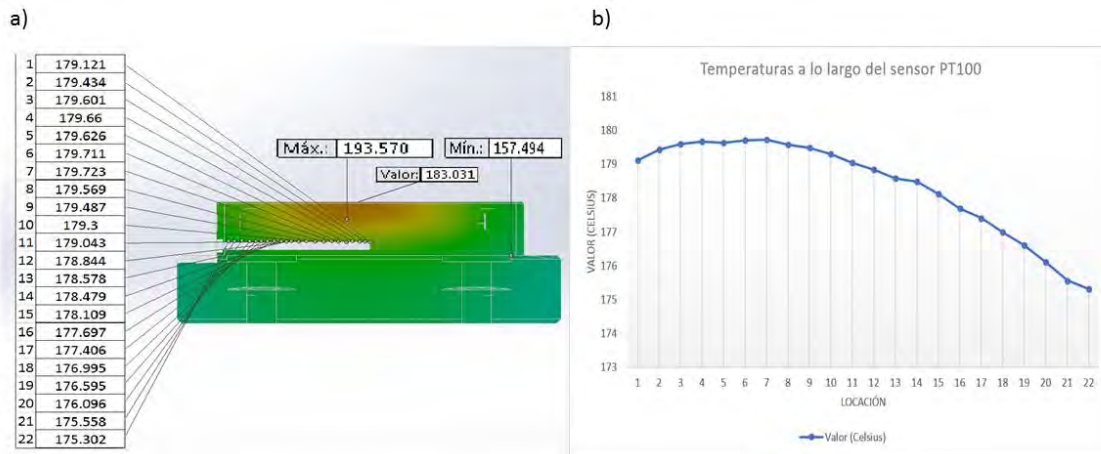


Figura 2.16. a) Variaciones en la simulación de temperaturas a lo largo del cuerpo del sensor PT-100. **b)** Grafica de la variación de temperatura desde la punta del sensor PT100 a la base.

Los resultados obtenidos confirman el diseño y permiten proceder con la manufactura de los componentes que conformarán la armadura de soporte del prototipo de la prensa, asegurando durabilidad, seguridad para el usuario y expansión de sus capacidades de prensado. Incluso, es posible considerar aumentar el área de los electrodos, siempre y cuando éstos se mantengan dentro de las medidas de la placa inferior y de la disponibilidad de un elemento de fuerza que cumpla con los requisitos de capacidad máximos.

CAPÍTULO 3

MANUFACTURA DEL PROTOTIPO

Este capítulo describe el maquinado de las piezas diseñadas y simuladas en el capítulo anterior, y la descripción de la implementación de los componentes electro-neumáticos que conformarán el prototipo de prensado. Todas las piezas de la armadura de soporte, fueron maquinadas con una herramienta giratoria CNC. La empresa Festo Pneumatics fue la encargada de suministrar los componentes electro-neumáticos e integrarlos en un gabinete de control y de proveer asistencia técnica para la implementación de la programación.

3.1 Armadura de soporte

Para la manufactura de las placas de la armadura de soporte, se utilizó acero negro A36, las cuales fueron maquinadas con una herramienta fresadora CNC marca Kimitsu en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Inicialmente se llevó a cabo un barrenado preliminar de las placas, además del maquinado de las cajas donde descansará el cilindro neumático. Cabe mencionar que el proyecto se encuentra aún en fase de construcción, por lo que hasta el momento solo se han maquinado las placas superior e intermedia. La figura 3.1 muestra la CNC del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) usada para el maquinado.



Figura 3.1. Fresadora CNC utilizada para el maquinado de las placas de soporte.

Posterior al barrenado se realiza un desbastado de las caras de cada pieza utilizando un buril de Acero-Cobalto HSS-Co5 principalmente para nivelar las aristas, además de remover la corrosión de toda la superficie. Se utilizó este tipo de buril porque en comparación con el buril clásico de carburo de tungsteno, el HSS-Co5 puede ser usado a alta velocidad de giro, además de que los de carburo sirven principalmente para materiales no ferrosos, ya que forman cráteres con facilidad y se desgastan fácilmente, aparte de tener un punto de fusión menor, lo cual los hace poco adecuados para altas velocidades de giro. Las figuras 3.2a y 3.2b muestran el buril usado y el detalle del devastado de la placa intermedia.

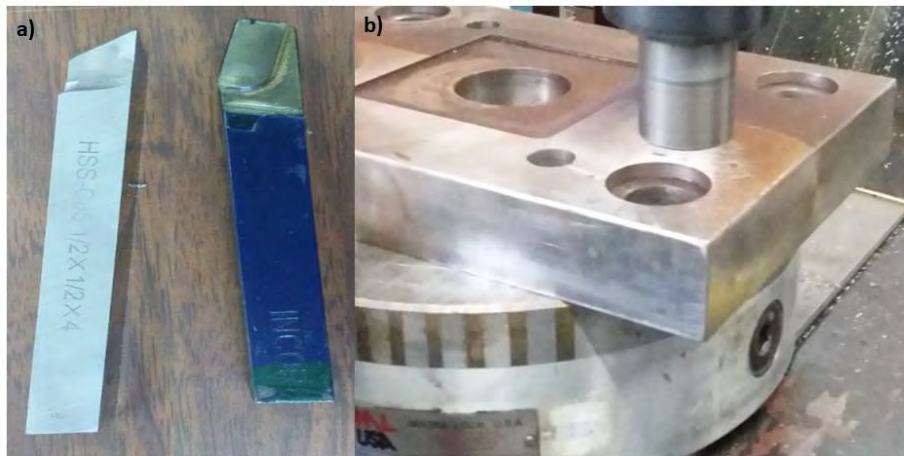


Figura 3.2. a) Buril de acero-cobalto HSS-Co5 (izquierda) vs de carburo de tungsteno (derecha) y b) Proceso de desbastado de caras de la placa intermedia.

Cabe mencionar que las piezas fueron recubiertas con pintura anticorrosiva para asegurar la durabilidad del material y prolongar la vida útil de la estructura.

Posterior al proceso de careado y barrenado preliminar, se realiza la rectificación de las cajas y de los barrenos (figura 3.3a y 3.3b), siendo las primeras las más críticas ya que de resultar muy justas podrían causar daño a la carcasa del cilindro neumático, mientras que en caso contrario (es decir ser muy holgadas) podrían afectar el posicionamiento del mismo, provocando desajustes en el resto del ensamble.

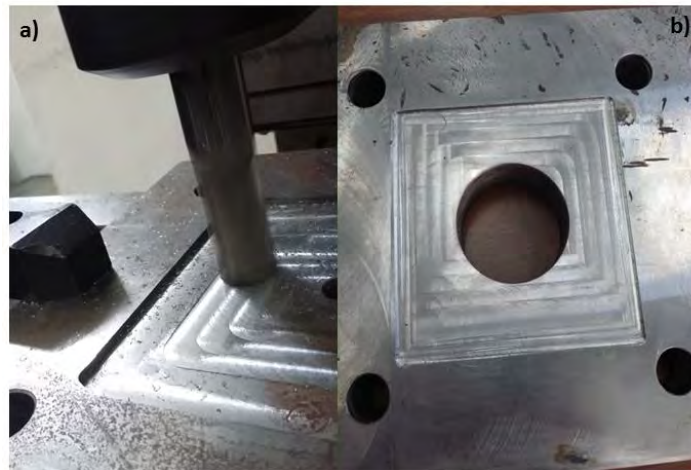


Figura 3.3 a) Proceso de rectificado de la caja de la placa superior. b) Acabado final de la caja de la placa superior.

Para asegurar la precisión del maquinado, se implementó un breve algoritmo para programar la fresadora CNC donde se definieron las medidas de las operaciones a ejecutar y la profundidad de las mismas. El anexo 2, incluye el código del algoritmo utilizado para el maquinado en el CNC.

Para el caso de las varillas, se utilizaron espárragos sinfin de acero inoxidable T304 prefabricadas de medidas 1 in y 0.75 in, de las cuales las varillas inferiores miden 32 cm (1.05 ft), mientras que las superiores miden 91.5 cm (3 ft) respectivamente. La figura 3.4 muestra una foto de los espárragos usados en el ensamblaje de la armadura de soporte.

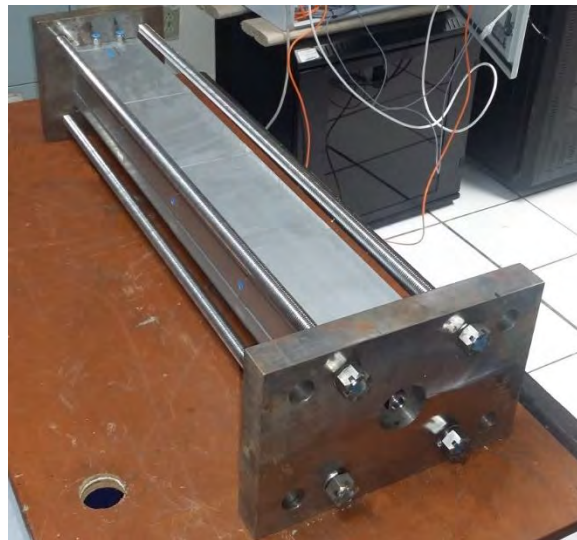


Figura 3.4 espárragos de 0.75 in utilizados para el ensamblaje de la parte superior de la armadura de soporte.

3.2 Sistema electro-neumático

La aplicación de esta prensa es para la fabricación de ensambles membrana-electrodo, para esto se necesitan presiones relativamente altas con un incremento preciso, además de tener la posibilidad adicional de completar el proceso de manufactura de mili-stacks tipo PEM que requieren de presiones mucho menores (respecto a las necesarias para el prensado de la MEA) para su ensamblado. Aunque el objetivo principal de la prensa es el de la manufactura de ensambles, el equipo podría tener la capacidad mecánica de generar fuerzas lo suficientemente pequeñas para el ensamblado de mili-stacks.

Para este proyecto, el elemento de fuerza mecánica seleccionado es un cilindro neumático Festo ADN-100-150, controlado por una válvula proporcional la cual regulará el paso de la presión neumática hacia el pistón para lograr un aumento paulatino de la fuerza mecánica que éste ejercerá sobre la placa térmica. Este proceso de control modulado de presión se realiza con el objetivo de lograr una rampa de presión positivo-negativa. En la fase positiva del ciclo de trabajo, el pistón puede alcanzar hasta 18 kN de fuerza. Inicialmente se definió un incremento de la fuerza a una razón de aproximadamente 100 N/s (≈ 10 kgf/s).

3.2.1 Circuito neumático

Entre las características principales del circuito neumático está el control de la presión sobre las placas térmicas, este factor es importante porque determinará la calidad de los ensambles obtenidos. El control de la presión mecánica se llevará a cabo regulando la presión neumática que llega al pistón por medio de una válvula proporcional que será manipulada por un controlador lógico programable (PLC). La figura 3.5 describe las tres etapas del circuito neumático que son: suministro, control y actuación.

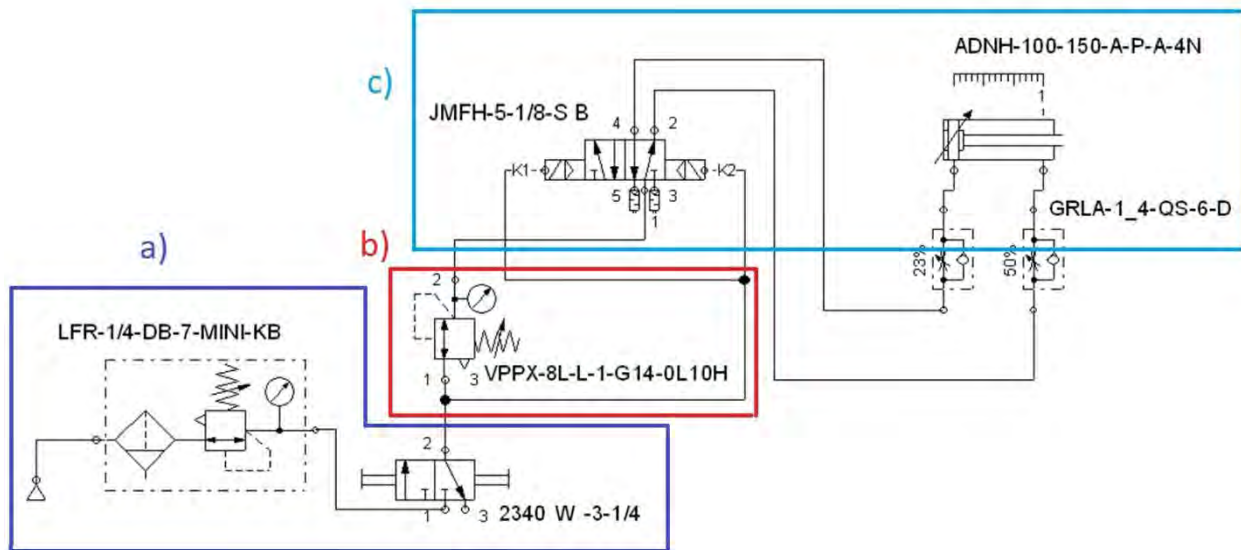


Figura 3.5. Etapas que componen el sistema neumático: **a)** Suministro, **b)** Control y **c)** Actuación.

El circuito neumático, consta de una combinación de componentes electro-neumáticos y neumáticos. La selección y orden de los componentes instalados fue diseñado considerando la seguridad de los usuarios, la seguridad de los componentes y el buen desempeño del sistema en general.

Suministro de fluido de trabajo

La fase de suministro consta de tres componentes básicos considerados en toda instalación neumática: Una fuente de fluido de trabajo a presión (que en este caso será siempre aire comprimido a 8 bar máximo), una unidad de mantenimiento y una válvula de paso. El dispositivo generador de fluido de trabajo a presión puede variar en tipo y marca de acuerdo de las posibilidades del área de trabajo en la que se ocupe el prototipo. La unidad de mantenimiento Festo LFR-1/4-DB-7-MINI-KB regula la presión de entrada, atrapa la humedad generada por la condensación de los cambios de presión e impurezas provenientes de la compresora. La válvula de corredera W-3-1/4 del tipo normalmente cerrada, la cual sirve de bloqueo intermedio entre la unidad de mantenimiento y la válvula proporcional. La Tabla 3.1 y 3.2 describen las características de los componentes de la fase de suministro. La figura 3.6 presenta la disposición de la unidad de mantenimiento y la válvula de corredera que suministrarán el aire a presión a los demás componentes del prototipo.



Figura 3.6. Imagen de la unidad de mantenimiento y la válvula de corredera instalados correctamente.

La fase de suministro se encarga de proveer del fluido de trabajo a las fases de control y de actuación paralelamente ya que, aunque la fase de actuación está seriada con la de control, ambas requieren de presión neumática independiente para su funcionamiento.

Tabla 3.1. Características técnicas de la unidad de mantenimiento Festo LFR-1/4-DB-7-MINI-KB [15]

Tamaño	Mini
Ancho	88 mm
Función de escape	no estrangulable
Serie	DB
Tipo de accionamiento	manual
Asegurar el accionamiento	Botón giratorio con enclavamiento Candado (opcional)
Posición de montaje	vertical +/- 5°
Grado de filtración	40 µm
Purga del condensado	giro manual
Construcción	Válvula de cierre - Unidad de filtro y regulador - Módulo distribuidor
Cantidad máxima del condensado	13 ml
Función del regulador	Presión inicial con escape secundario con flujo inverso sin compensación de presión inicial
Indicación de la presión	manómetro
Presión de funcionamiento	1.5 a 10 bar
Margen de regulación de la presión	0.5 a 7 bar
Histéresis máxima de la presión	0.5 bar
Caudal nominal máx.	2,500 l/min
Caudal nominal normal	1,900 l/min
Fluido	Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:9:4]
Indicación sobre los fluidos de funcionamiento y de mando	Sin opción de funcionamiento con lubricación
Clase de resistencia a la corrosión KBK	1
Temperatura de almacenamiento	-5 ... 50 °C
Clase de pureza del aire en la salida	Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:8:4]
Temperatura del medio	-5 ... 50 °C
Temperatura ambiente	-5 ... 50 °C
Peso del producto	270 g
Tipo de fijación	a elegir: Montaje del conducto con taladro pasante con escuadra de montaje
Conexión del manómetro	G1/8
Conexión neumática 1	G1/4
Conexión neumática 2	G1/4
Conexión neumática 3	G1/4

Tabla 3.2. Características técnicas de la válvula de corredera Festo W-3-1/4 [15]

Característica	Propiedades
Función de las válvulas	3/2 bi-estable
Conexión neumática 1	G1/4
Conexión neumática 2	G1/4
Tipo de accionamiento	manual
Tipo de fijación	Montaje del conducto atornillable
Caudal nominal normal	1,000 l/min
Diámetro nominal	7 mm
Presión de funcionamiento	-0.95 a 10 bar
Temperatura ambiente	-10 a 60 °C
Información sobre el material del cuerpo	Latón
Fluido	Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:4:4]
Principio de hermetización	Blando
Posición de montaje	Indistinto
Construcción	Válvula tipo camisa
Tipo de control	Directo
Sentido del flujo	Reversible
Indicación sobre los fluidos de funcionamiento y de mando	Opción de funcionamiento con lubricación (necesaria en otro modo de funcionamiento)
Temperatura del medio	-10 a 60 °C
Fuerza de accionamiento	20 N

Etapa de control

La fase de control es un subsistema “esclavo” que se encarga del aumento y decremento proporcional de la presión neumática, controlado por una señal de entrada-salida de corriente eléctrica (4-20 mA_{CD}). Esta fase consta de un componente electro-neumático, la válvula de presión proporcional Festo VPPX-8L-L-1-G14-0L10H-S1 (figura 3.7), controlada por el componente de control Festo CPX (ver capítulo. 4). La tabla 3.3 describe las características técnicas de la válvula VPPX.

El funcionamiento de la válvula proporcional no es trivial, la válvula en sí contiene un sistema de control propio el cual monitorea la presión de salida en todo momento, comparándola con el valor de entrada que se ingrese.



Figura 3.7. Válvula proporcional VPPX-8L-L-1-G14-0L10H-S1 que se instaló en el gabinete de control.

El diagrama de la figura 3.8 muestra un circuito de regulación cerrado. La magnitud de referencia w (valor de consigna, p/e 5 V u 8 mA) primero incide en un comparador. El dispositivo de medición emite la señal correspondiente a la magnitud regulada x (valor real, por ejemplo 3 bar) en calidad de magnitud retroalimentada r , que es recibida por el comparador. El elemento regulador detecta la desviación e y activa el elemento final de control. La señal de salida del elemento final de control incide en el tramo de regulación. De esta manera, el elemento regulador, con ayuda del elemento final de control trata de compensar la diferencia entre la magnitud de referencia w y la magnitud regulada x .

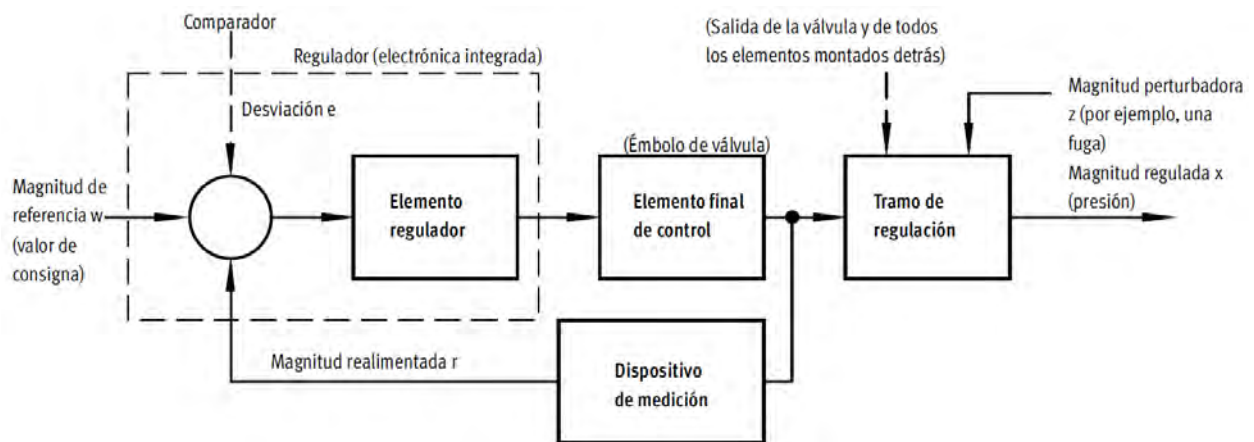


Figura 3.8. Diagrama de circuito de regulación del sistema de control de la válvula proporcional Festo VPPX-8L-L-1-G14-0L10H-S1.

El funcionamiento de la válvula VPPX se basa en una señal de entrada temporal, la válvula almacena el valor consigna y mantiene la regulación basada en ese valor. Si el comparador recibe un valor de referencia w distinto, este borrará de la memoria el valor anterior y almacenará el nuevo dato, reiniciando su ciclo de regulación, ahora respecto al nuevo valor ingresado.

El sistema de la válvula proporcional siempre detecta cualquier cambio de la magnitud de referencia. Pero también se produce una desviación si la magnitud de referencia se mantiene constante y si cambia la magnitud regulada. Este es el caso cuando el caudal varía al atravesar la válvula debido a una operación de conmutación, a un movimiento del cilindro o a un cambio de carga. También la magnitud perturbadora z puede provocar una desviación. Por ejemplo, una caída de presión en el sistema de alimentación de aire. La magnitud perturbadora z no incide intencionadamente en la magnitud a regular x . En todos estos casos, el regulador intenta modificar la magnitud regulada x para igualarla a la magnitud de referencia w .

Tabla 3.3. Características técnicas de la válvula proporcional VPPX [15].

Característica	Propiedades
Diámetro nominal alimentación de aire	8 mm
Diámetro nominal purga de aire	7 mm
Tipo de accionamiento	Eléctrico
Principio de hermetización	Blando
Posición de montaje	Indistinto
Construcción	Válvula reguladora de membrana, servo-pilotada
Anticortocircuitaje	Para todas las conexiones eléctricas
Medidas de seguridad	Posición de seguridad VPPX
Polos inconfundibles	Para todas las conexiones eléctricas
Tipo de reposición	Muelle mecánico
Tipo de control	Pre-pilotado
Función de las válvulas	Regulador de presión proporcional de 3 vías
Tipo de display	LED
Margen de regulación de la presión	0.1 a 10 bar
Presión inicial	1 0 a 11 bar
Histéresis máxima de la presión	0.05 bar
Caudal nominal normal	2,750 l/min
Margen de tensión de funcionamiento DC	21.6 a 26.4 V
Factor de utilización	100%
Consumo máximo de potencia eléctrica	7 W
Ondulación residual	10 %
Margen de señal de la salida analógica	4 - 20 mA 0 - 10 V 0 - 20 mA
Margen de señal de la entrada analógica	4 - 20 mA 0 - 20 mA 0 - 10 V
Fluido	Gases inertes Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:4:4]

Indicación sobre los fluidos de funcionamiento y de mando	Sin opción de funcionamiento con lubricación
Marca CE (ver declaración de conformidad)	según la normativa UE sobre EMC
Clase de resistencia a la corrosión KBK	2
Temperatura del medio	10 a 50 °C
Tipo de protección	IP65
Temperatura ambiente	0 a 60 °C
Homologación	RCM Mark
Peso del producto	560 g
Error de linealidad FS	2 %
Coefficiente térmico	0.04 %/K
Precisión de repetición FS	0.5 %
Precisión de repetición en \pm %FS	0.5 %FS
Conexión eléctrica	Conector M12 (8 contactos)
Tipo de fijación	con accesorios con taladro pasante
04/05/2015 – Reservado el derecho de modificación – Festo AG & Co. KG 1 / 2	04/05/2015 – Reservado el derecho de modificación – Festo AG & Co. KG 1 / 2

Actuación

La etapa de actuación también es realizada por un subsistema esclavo que consta de dos componentes: uno electro-neumático y otro neumático; la válvula piloto bidireccional Festo JMFH-5-1/8-SB y el cilindro de fuerza Festo ADNH-100-150-I-P-A-4N, respectivamente.

La válvula JMFH es una válvula de 5/2 vías (cinco vías y dos posiciones) que es controlada por dos bobinas magnéticas MSFG-24/42-50/60-OD que a su vez son controladas por la unidad de control CPX y que activan el selector de vías para permitir el paso de la presión regulada de salida de la válvula VPPX. Además, para su funcionamiento, debe ser alimentada con aire a presión a 6 bares directamente de la unidad de mantenimiento para el movimiento del selector de vías. Las 2 salidas (reguladas por la VPPX) de la válvula piloto están conectadas en serie al avance y retroceso del cilindro ADNH siempre ubicando la línea pasiva en la vía de purgado para liberar la presión del cilindro.

La figura 3.9 describe las partes que componen a la válvula piloto bidireccional JMFH, donde: 1) es el cuerpo de la válvula, 2) bobina magnética MSFG-24/42-50/60-OD (normalmente cerrada) una en cada extremo, 3) entrada de presión neumática (6 bar) para selector de vías, una en cada extremo, 4) entrada de presión neumática regulada por la válvula proporcional VPPX, 5) cable de corriente KMF-1-24DC-2,5, uno en cada extremo, 6) salida de presión neumática regulada para avance del vástago, 7) salida de presión neumática regulada para retroceso del vástago y 8) silenciadores de purgado AMTE-M-H-G18 (x4).

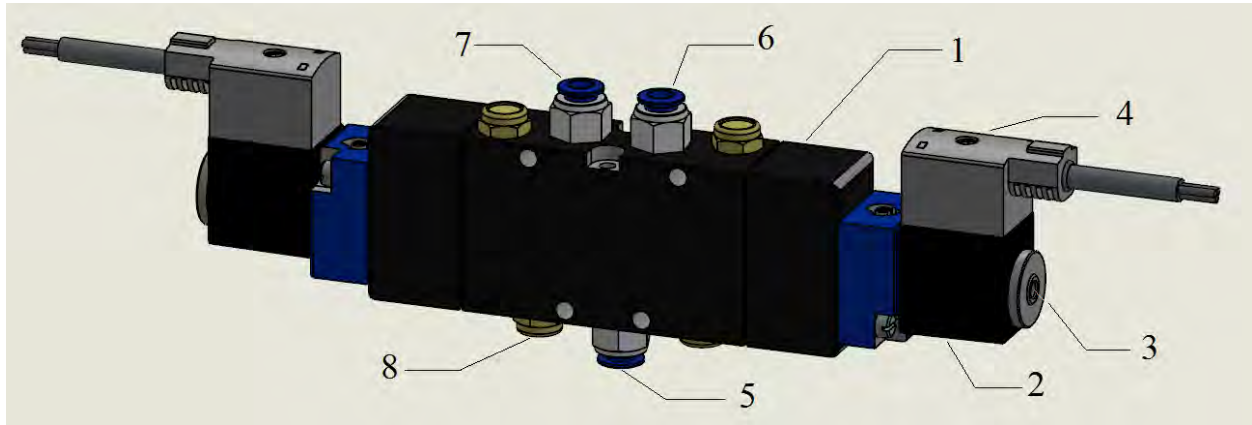


Figura 3.9. Partes que componen la válvula piloto Festo JMFH-5-1/8-SB.

Tabla 3.4 Características técnicas de la válvula bidireccional JMFH-5-1/8-SB [15].

Función de las válvulas	5/2 bi-estable
Tipo de accionamiento	Eléctrico
Caudal nominal normal	1,000 l/min
Presión de funcionamiento	-0.9 ... 10 bar
Construcción	Corredera
Diámetro nominal	8 mm
Accionamiento manual auxiliar	Con enclavamiento cubierto mediante pulsador
Tipo de control	Pre pilotado
Alimentación del aire de control	Externo
Sentido del flujo	Reversible
Presión de control	2 a 10 bar
Tiempo de conmutación a la inversión	18 ms
Valores característicos de las bobinas	24VDC:2,5
Fluctuación de tensión permisible	+/- 10 %
Fluido	Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:4:4]
Indicación sobre los fluidos de funcionamiento y de mando	Opción de funcionamiento con lubricación (necesaria en otro modo de funcionamiento)
Temperatura del medio	-10 a 60 °C
Fluido de control	Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:4:4]
Temperatura ambiente	-5 a 50 °C
Peso del producto	560 g
Conexión eléctrica	Forma B según EN 175301-803
Tipo de fijación	A elegir: con taladro pasante en el distribuidor PR
Conexión del aire de pilotaje auxiliar 12	G1/8
Conexión del aire de pilotaje auxiliar 14	G1/8
Conexión del aire de escape de pilotaje 82	M5
Conexión del aire de escape de pilotaje 84	M5
Conexión neumática 1	G1/8

Conexión neumática 2	G1/8
Conexión neumática 3	G1/8
Conexión neumática 4	G1/8
Conexión neumática 5	G1/8

En la figura 3.10, se muestra al cilindro de fuerza Festo ADNH-100-150-I-P-A-4N, el cual es un cilindro de fuerza tándem de doble acción con una fuerza máxima de 18,281 N nominales, a 6-8 bares de presión neumática. El componente consta de 4 cámaras en serie que se llenan simultáneamente empujando un vástago de 4 émbolos ya sea para avance o retroceso dependiendo de la vía de entrada a la que se le suministre la presión neumática. El émbolo frontal del cilindro cuenta con una banda magnética la cual activa dos sensores de posición para definir si el vástago se encuentra en posición final (avance) o inicial (retroceso).

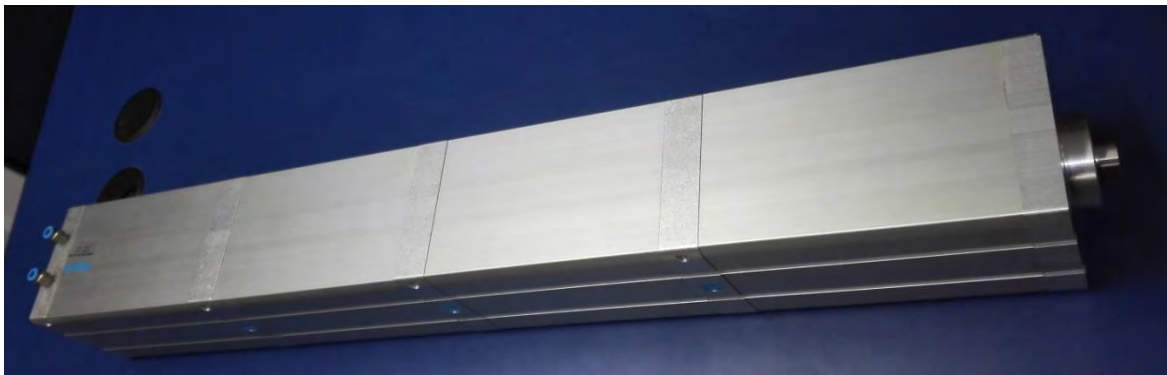


Figura 3.10. Cilindro de fuerza tándem Festo ADNH-100-150-I-P-A-4N

Tabla 3.6 Características técnicas del cilindro ADNH-100-150-I-P-A-4N [15]

Característica	Propiedades
Carrera	1 a 150 mm
Diámetro del émbolo	100 mm
Basado en la norma	ISO 21287
Amortiguación	P: amortiguación por tope elástico/placa a ambos lados
Posición de montaje	Indistinto
Modo de funcionamiento	De doble efecto
Construcción	Vástago Tubo perfilado Émbolo
Detección de la posición	Para sensores de proximidad
Variantes	Prolongación de la rosca exterior del vástago Homologación de protección anti deflagrante (ATEX) Rosca especial en el vástago Vástago prolongado Juntas termorresistentes hasta máx. 120 °C Placa de tipo grabada con laser

Presión de funcionamiento	0.6 a 10 bar
Fluido	Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:4:4]
Indicación sobre los fluidos de funcionamiento y de mando	Opción de funcionamiento con lubricación (necesaria en otro modo de funcionamiento)
Clase de resistencia a la corrosión KBK	2
Temperatura ambiente	-20 ... 120 °C
Fuerza teórica con 6 bar, retroceso	4,417 N
Fuerza teórica con 6 bar, avance	18,281 N
Tipo de fijación	a elegir: con rosca interior con accesorios
Conexión neumática	G1/8
Indicación sobre el material	Conforme con RoHS (de las siglas en inglés <i>Restriction of Hazardous Substances</i>)
Información sobre el material de la tapa	Anodizado Aleación forjable de aluminio
Información sobre el material de las juntas	TPE-U(PU)
Información sobre el material del cuerpo	Anodizado Aleación forjable de aluminio
Información sobre el material del vástago	Acero de aleación fina

El funcionamiento de la fase de actuación es de 2 pasos básicamente. Para el paso de retroceso del vástago, cuando este está en posición final la válvula piloto se activa en modo retroceso, purgando la vía de avance del pistón y permitiendo el paso de presión regulada a la vía de retroceso del mismo (figura 3.11), el descenso en la presión de las cámaras de avance más el aumento paulatino de la presión en las cámaras de retroceso, moverán el vástago en sentido ascendente.

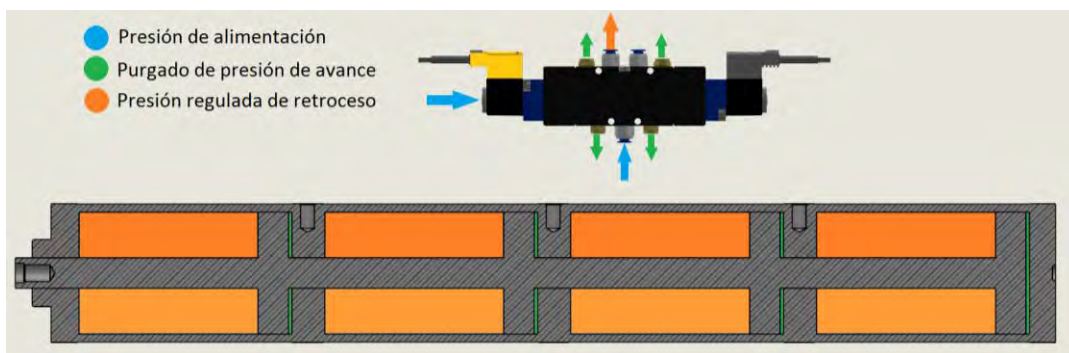


Figura 3.11. Imagen ilustrativa del paso de retroceso de la fase de actuación.

De manera análoga, para iniciar el paso de avance del vástago, la JMFH permite el paso de presión hacia la vía de salida regulada de avance y encausa la presión en las cámaras de retroceso hacia las vías de purgado, generando así una diferencia de presión, provocando el movimiento del vástago en dirección descendente (figura 3.12), aumentando la presión proporcionalmente al llegar al punto muerto inferior.

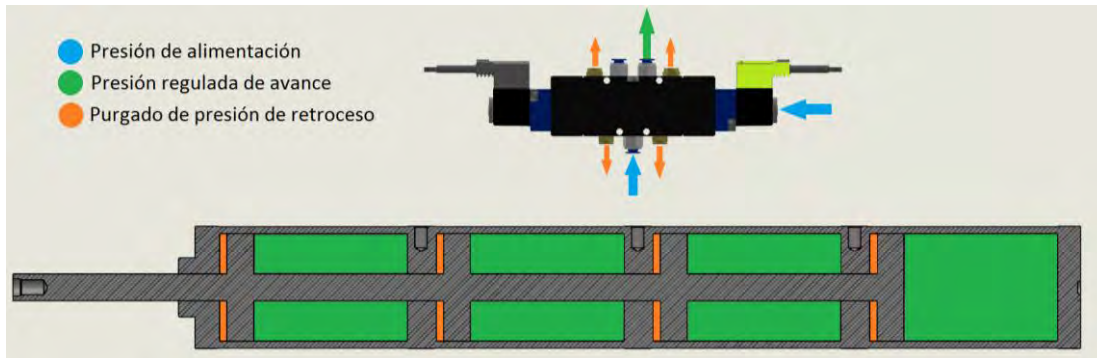


Imagen 3.12. Imagen ilustrativa del paso de avance de la fase de actuación.

3.2.2 Circuito eléctrico

El circuito neumático está directamente ligado al circuito eléctrico ya que, con excepción de la unidad de mantenimiento, el resto de los componentes necesitan potencia eléctrica de cierta magnitud para trabajar correctamente. La función primaria de este sub-sistema es el suministro de energía eléctrica en CD para la unidad de control y para los sensores y actuadores. De forma análoga, el circuito eléctrico se compone de 3 etapas: 1) suministro, 2) control y 3) actuación. La figura 3.13 muestra de manera gráfica estas etapas.

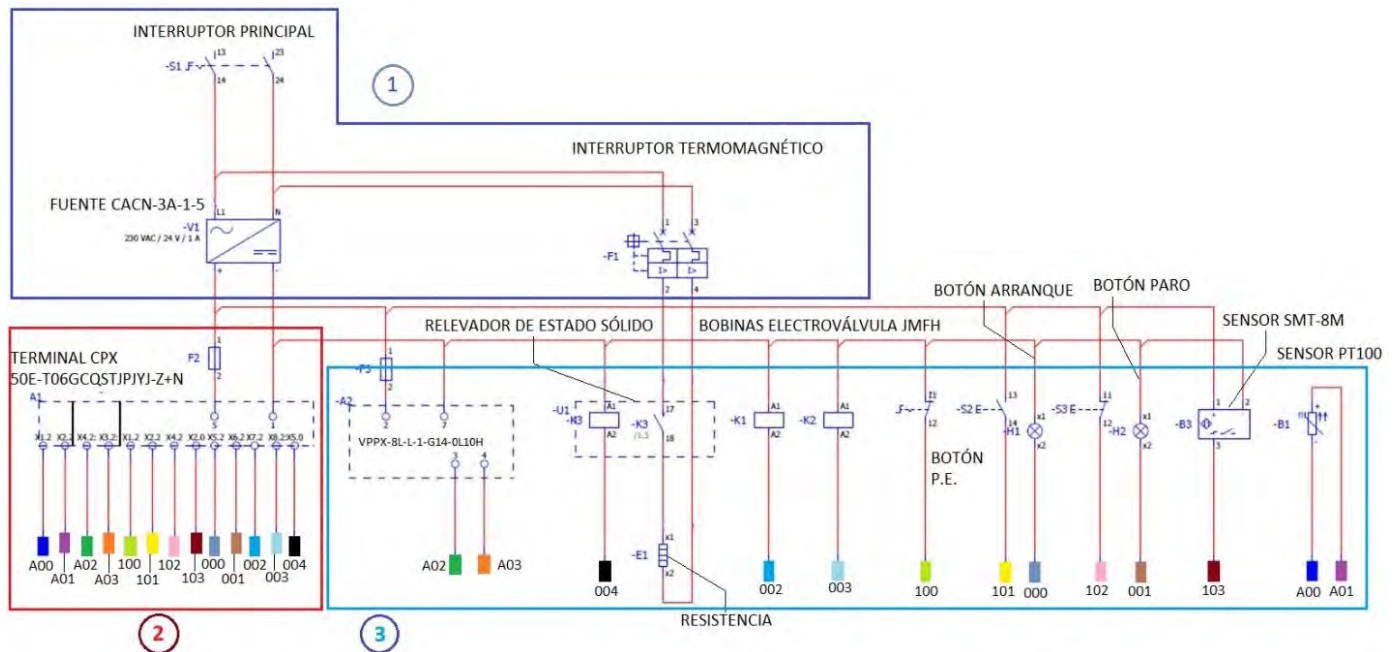


Figura 3.13. Diagrama del circuito eléctrico del sistema electro-neumático y sus tres fases: 1) suministro, 2) control y 3) actuación.

Todos los componentes electrónicos, eléctricos y electro-neumáticos, se encuentran instalados y/o conectados dentro de un gabinete de acero inoxidable de medidas 500 cm x 500 cm x 300 cm. La figura 3.14 describe la distribución de los componentes instalados en el gabinete, y que integran el circuito electro-neumático casi en su totalidad.

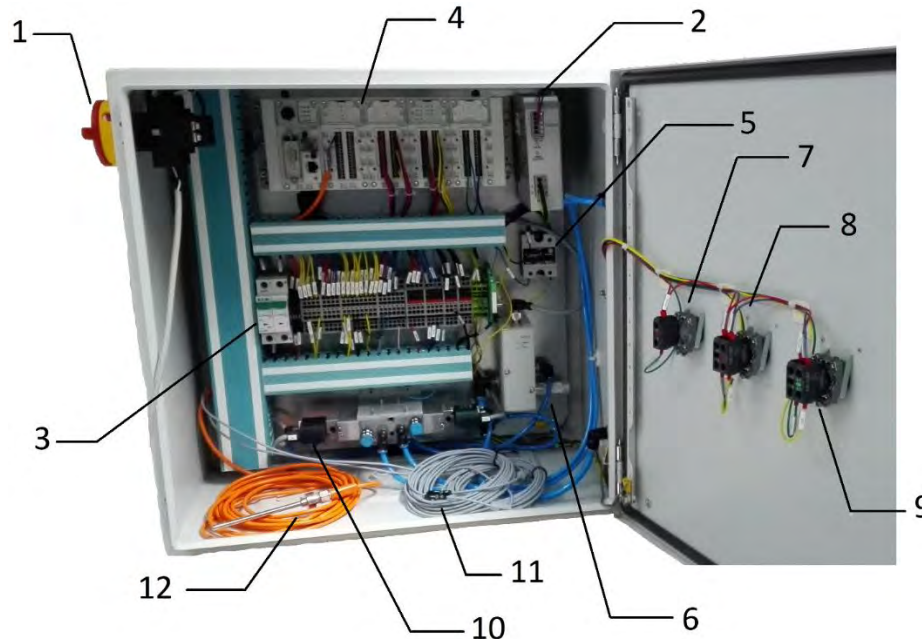


Figura 3.14. Distribución de los componentes dentro del gabinete de control de acuerdo al circuito.

Las partes que componen al gabinete de control son: 1) interruptor principal, 2) fuente Festo CACN-3A-1-5, 3) interruptor termo magnético, 4) terminal Festo CPX-50E-T06GCQSTJPJYJ-Z+N, 5) relevador de estado sólido, 6) válvula proporcional Festo VPPX 8L.L.1.G14.0L10H, 7) botón 'paro de emergencia', 8) botón paro, 9) botón inicio, 10) bobinas magnéticas p/válvula JMFH, 11) sensores de posición Festo SMT-8M y 12) sensor de temperatura PT-100.

Suministro

La fase de suministro consta de tres componentes esenciales: un interruptor principal marca Eaton P1-32/EA/SVB, una fuente rectificadora CA/CD Festo CACN-3A-1-5 (figura 3.15) y un interruptor termo magnético Eaton, el cual está conectado en paralelo con la fuente. El interruptor principal se conecta a la línea monofásica de 124 VCA. Esta tensión es recibida por la fuente que la convierte en una tensión nominal de salida de 24 VCD y una corriente de salida de 5 A.



Figura 3.15. Fuente de poder Festo CACN-3A-1-5

La fuente de poder alimenta a todos los componentes electrónicos del sistema para su funcionamiento. Adicionalmente el PLC recibe y envía señales de tensión o corriente para el control del prototipo (ver cap. 4), sin embargo, esta energía regulada es proveída en bruto por la fuente de poder. La Tabla 3.8 describe las características técnicas de la fuente de potencia.

Tabla 3.8. Características técnicas de la fuente CACN-3A-1-5 [15].

Característica	Propiedades
Ancho	40 mm
Alto	130 mm
Largo	115 mm
Posición de montaje	Convección libre
Alimentación primaria	1 fase
Corriente de entrada	0,9 - 1,65 A
Tensión de salida nominal	DC 24 V
Corriente de salida nominal	5 A
Margen de tensión de entrada AC	100 ... 240 V
Puenteo en cortes de red	110 ms
Frecuencia de la línea	45 ... 65 Hz
Marca CE (ver declaración de conformidad)	según la normativa UE sobre EMC según la normativa UE de baja tensión
Temperatura de almacenamiento	-40 ... 85 °C
Humedad relativa del aire	95%
Tipo de protección	IP20
Temperatura ambiente	-25 ... 70 °C
Homologación	C-Tick c UL us - Listed (OL)
Peso del producto	600 g
Tipo de fijación	con perfil DIN
Indicación sobre el material	contiene sustancias perjudiciales para la pintura Conforme con RoHS

Control

La fase de control del circuito eléctrico consta únicamente de un componente, la unidad de control Festo CPX-CEC 50E-T06GCQSTJPJYJUU-Z+N (figura 3.15). Cabe mencionar, que esta sección se enfoca en las características técnicas del equipo, en el capítulo 4 se explica más a fondo las capacidades y métodos de programación de la unidad de control.

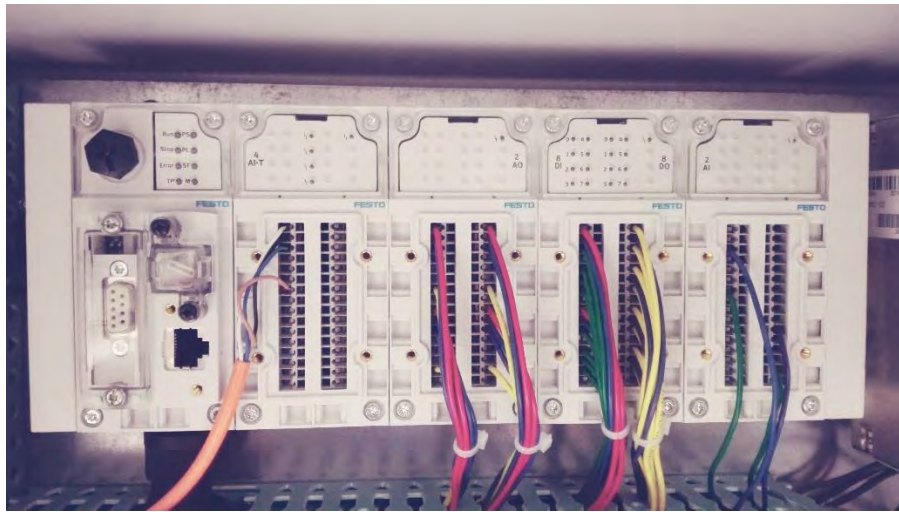


Figura 3.16. Imagen de la unidad de control CPX-CEC con sus módulos de E/S integrados en el gabinete de control.

La unidad de control CPX trabaja con una tensión nominal de 24 VCD y un consumo de corriente con tensión de funcionamiento de 85 mA. Como se explicará más adelante, la unidad CPX es un controlador modular al que se le pueden agregar un número de módulos de entradas y salidas. Dado que el controlador tiene un límite de carga de salida, éste sólo puede soportar el número de E/S que no supere sus valores nominales de potencia. La Tabla 3.9 describe sus características técnicas tanto de valores energéticos nominales como de funcionamiento.

Tabla 3.9. Características técnicas de la unidad de control CPX-CEC [15]

Característica	Propiedades
Dimensiones A x L x H	50 mm x 107 mm x 55 mm
Diagnosís específica del dispositivo	Diagnosís del canal y diagnosís orientada al módulo - Módulos baja tensión/cortocircuito - Acumulador diagnosís
Datos CPU	32 MB Flash 32 MB RAM Procesador de 400 MHz
Ayuda a la configuración	CODESYS V2.3
Configuración de parámetros	CODESYS V2.3
Funciones adicionales	Diagnóstico de funciones Función de comunicación RS232
Elementos de control	Interruptor giratorio para RUN/Stop
Programación, idioma	DE, EN
Programación, soporte de manipulación de datos	sí
Velocidad de transmisión	10/100 Bit/s según IEEE 802.3 (10BaseT) o 802.3u (100BaseTx)
Tiempo de funcionamiento	Aprox. 200 μ s/1 k instrucciones
Interfaz de datos interfaz	Interfaz RS232 Sub-D, 9 contactos, conector tipo zócalo 9,6 ... 230,4 kBit/s aislamiento galvánico
Consumo de corriente con tensión de funcionamiento	Típico 85 mA
Ajuste de la dirección IP	DHCP Mediante CoDeSys a través de MMI
Módulos funcionales	leer módulo de diagnóstico CPX estado de diagnóstico CPX copiar localización de diagnóstico CPX y otros
Recordador	30 kB datos remanentes 8 MB memoria de datos global Sistema de variables CoDeSys
Tensión de funcionamiento nominal DC, tensión de carga	24 V sin neumática: 18 ... 30V con neumática de tipo Midi/Maxi: 21,6 ... 26,4V con neumática de tipo CPA: 20,4 ... 26,4V con neumática de tipo MPA: 18 ... 30V
Tensión nominal de funcionamiento DC	24 V
Puenteo en cortes de red	10 ms
Software de programación	CODESYS provided by Festo V2.3
Lenguaje de programación	según IEC 61131-3 diagrama de contactos lista de instrucciones (AWL) Texto estructurado Diagrama de funciones Lenguaje de pasos secuenciales Adicional CFC
Memoria de programa	4 MB programa de usuario
Clase de resistencia a la corrosión KBK	2

Temperatura de almacenamiento	-20 ... 70 °C
Humedad relativa del aire	95% sin condensación
Tipo de protección	IP65 IP67
Temperatura ambiente	-5 ... 50 °C
Peso del producto	155 g
Ethernet, número	1
Ethernet, velocidad de transmisión de datos	10/100 Mbit/s
Ethernet, protocolos compatibles	TCP/IP, EasyIP, Modbus TCP
Ethernet, conector	RJ45 Borne 8 contactos
Protocolo	CODESYS nivel 2 EasyIP Modbus TCP TCP/IP
Interfaz Ethernet	RJ 45 (conector tipo zócalo de 8 contactos)
Indicador LED específico del bus	TP: Link/Traffic
Indicador LED específico del producto	ERR: error del tiempo de ejecución PLC M: Modify/Forcen active PL: alimentación de carga PS: Alimentación de la parte electrónica, alimentación de los sensores RUN: estado PLC SF: error del Sistema STOP: estado PLC
Indicación sobre el material	Conforme con RoHS
Información sobre el material del cuerpo	PA reforzado PC

Actuación

En la fase de actuación se encuentran todos los componentes que influyen en el desempeño del prototipo. Está integrado por 9 componentes esenciales que son: relevador de estado sólido Allen-Bradley *700-SH25WA25*, válvula proporcional VPPX (ver sección 3.2.1.2), botón de paro de emergencia (normalmente abierto), botón de paro y botón de inicio (normalmente cerrados), 2 bobinas para electroválvula Festo *MSFG-24_42-50_60-OD*, 2 sensores de proximidad Festo *SMT-8M-A-NS-24V-E-0,3-M8D* y un sensor de temperatura PT100-TT0291.

La totalidad de estos componentes están interconectados a la unidad de control CPX, además de tener su propia alimentación para su funcionamiento (con excepción de los sensores). Los componentes que necesitan tensión de entrada para funcionar, lo hacen con una tensión nominal de 24 VCD.

El relevador de estado sólido (Figura 3.17), funge como interruptor de potencia para el paso de tensión proporcional para los cartuchos térmicos, los cuales tienen la posibilidad de aumentar su

temperatura de acuerdo a valores de variables de control PID. Esta variabilidad en el aumento de la corriente hacia las resistencias está definida por una señal analógica de corriente proveniente de la unidad de control (4-20 mA), el controlador compara la señal de entrada y trata de igualarla con la de salida a través del relevador de estado sólido, cambiando el estado de sus contactos con base en la señal de activación.



Figura 3.17. Imagen ilustrativa del relevador de estado sólido Allen-Bradley 700-SH25WA25.

La válvula proporcional VPPX trabaja con una tensión nominal de 24VCD, con un consumo máximo de potencia de 7W. Aunque esta válvula tiene su propio subsistema de control, se encuentra interconectada con la unidad central de control a través de una señal de corriente de 4-20 mA. La sección 2.2.1.2 explica a fondo el funcionamiento de este componente.

Los botones de emergencia, botón inicio y botón paro, son interruptores que envían señales pulso digitales a la unidad de control, que interpreta dichas señales y responde enviando señales a los diferentes componentes del sistema (Figura 3.18). En el capítulo 4 se describe a fondo la funcionalidad de dichos botones y las combinaciones de presionado que puede haber entre ellos para el control offline del sistema de prensado.



Figura 3.18. Botones de arranque, paro y paro de emergencia instalados en el gabinete de control.

Las bobinas magnéticas MSFG son el componente eléctrico de la válvula bidireccional JMFH (ver sección 3.2.1.3) y su función es mover el selector de vías de la válvula piloto cargándose electromagnéticamente, utilizando este principio para atraer o repeler los vástagos del selector de vías. Las bobinas trabajan con una tensión nominal de 24 VCD a una potencia de 4.3 W cada una. La imagen 3.19 muestra la bobina magnética desmontada y a la válvula bidireccional JMFH mostrando los vástagos magnetizables del selector de vías.



Figura 3.19. Bobina magnética Festo *MSFG-24_42-50_60-OD* y la válvula bidireccional Festo *JMFH-5-1-8-S-B* separadas.

El sistema de prensado consta de 2 tipos de sensores externos (además de los sensores de la VPPX que se consideran internos), sensores de posición y sensor de temperatura. Los sensores de posición SMT (figura 3.20) son de tipo NPN normalmente cerrados. Estos reaccionan con campos magnéticos, como el del embolo frontal del cilindro de fuerza ADNH, enviando una señal digital hacia la unidad de control. El sistema cuenta con dos de estos sensores para determinar el punto muerto inferior y superior del cilindro. Esta función es esencial para el correcto funcionamiento del sistema, ya que es mandatorio tener el control de la posición del vástago del cilindro para determinar si se puede iniciar con un ciclo de fuerza o de retroceso, además de los distintos bloqueos de seguridad con los que cuenta el sistema (ver capítulo 4). Los sensores de posición no consumen energía de la unidad de control, sino que se energizan por el efecto electro magnético que se genera al acercarse al campo magnético del embolo del cilindro.



Figura 3.20. Sensor de posición Festo *SMT-8M-A-NS-24V-E-0,3-M8D* utilizado para el sensado de la posición del émbolo del cilindro de fuerza ADNH.

El sensor de temperatura PT100 es un sensor menos trivial. Es un detector de temperatura resistivo o RTD (por sus siglas en inglés: Resistive Temperature Detector) y su funcionamiento se basa en la propiedad de los metales de variar su resistencia eléctrica respecto a la temperatura, este modelo es de composición de acero inoxidable y funciona en rangos de temperatura de $-40 \dots 150$. En la figura 3.21 se aprecia una imagen del sensor de temperatura del sistema. Cabe mencionar que el sensor detecta temperaturas a lo largo de toda la probeta, sin embargo, el aumento del error es directamente proporcional a la distancia de la zona de sensado. En el capítulo 4d se profundiza más al respecto de la lectura del sensor y de su relación directa con el sistema térmico.



Figura 3.21. Imagen del sensor PT100 instalado en el sistema de prensado, la zona rugosa de la punta (2 cm) es la definida como ideal para la medición de la temperatura.

Todos los componentes arriba mencionados conforman prácticamente en su totalidad el sistema de prensado para electrodos. El siguiente capítulo se enfoca principalmente en la unidad de control CPX, el diagrama de flujo del ciclo de trabajo y en la programación que hace posible el funcionamiento y la intercomunicación de los componentes entre sí, además de permitir la interacción con el usuario.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL

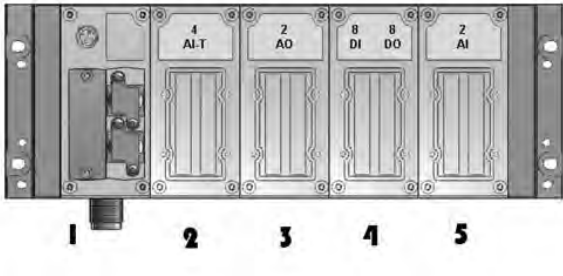
El control es realizado por la unidad de control CPX-CEC 50E-T6-GC-QS-TJPJYJUI-Z+N (UC) la cual consta de un controlador embebido CoDeSys, un módulo de 4 entradas analógicas de temperatura RTD, un módulo de 2 salidas analógicas, un módulo con 8 I/O digitales y un módulo de 2 entradas analógicas.

4.1 Características de la unidad de control

La UC es un sistema de control con el que es posible realizar la programación con CoDeSys según IEC 61131-3, el cual es la tercera edición del estándar 61131. Esta edición define como un conjunto mínimo los elementos básicos de programación, como lo son reglas sintácticas y semánticas para los lenguajes de programación usados más comúnmente, incluyendo los lenguajes gráficos de diagrama de escalera y diagrama de bloques de funciones y los lenguajes textuales de lista de instrucciones y texto estructurado. Además, contiene los principales campos de aplicación, pruebas aplicables y medios por los cuales los fabricantes pueden expandir o adaptar esos conjuntos básicos a sus propias implementaciones de controlador programable.

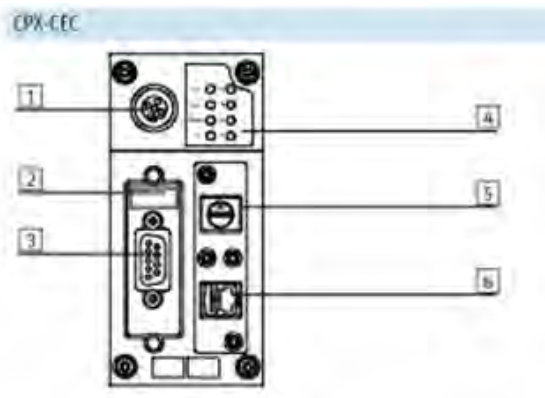
La UC, como la mayoría de los PLC está configurado como un sistema modular, al cual se le pueden agregar diferentes módulos de entradas y salidas de acuerdo a los requerimientos técnicos del proyecto. La Tabla 4.1 describe los componentes relacionados a las letras que componen el nombre particular de la unidad modular.

Para lograr la transferencia de datos hacia la unidad de control, se utiliza la interface Ethernet del módulo. El componente cuenta con conexiones adicionales para la transferencia de datos, sin embargo, la conectividad Ethernet es la más adecuada para este proyecto, ya que asegura un medio de comunicación seguro para la edición constante de los valores de entrada.

Tabla 4.1. Descripción de la unidad de control y las partes que lo compone


Cod. Ident.	Cantidad	Descripción	Modelo	Módulo
50E	1	Controlador embebido CoDeSys con terminal eléctrica modular CPX sin conectores nodales específicos	CPX-CEC	1
T06	1	Bloque de conexión con sistema de abastecimiento, M18 de 4 pines		
GC	1	Módulo de 4 entradas analógicas (temperatura, RTD)	CPX-4AE-T	
QS	1	Abrazadera de jaula para bloque del colector de 4 pines		
T	1	Módulo de 2 salidas analógicas	CPX-2AA-U-I	3
J	1	Abrazadera de jaula para bloque del colector de 4 pines		
P	1	Módulo de 8 entradas y 8 salidas digitales	CPX-8DE-8DA	4
J	1	Abrazadera de jaula para bloque del colector de 4 pines		
Y	1	Módulo de 2 entradas analógicas	CPX-2AE-U-I	5
J	1	Abrazadera de jaula para bloque del colector de 4 pines		
Z	1	placa de soporte		
N	1	Enchufe recto, M18 de 4 pines, (1.5 qmm), para voltaje de operación		

En la figura 4.1 se describen las partes de la unidad de control, donde: 1) es la conexión CPX-MMI, 2) el interruptor DIL, 3) la Interface RS232 (conector Sub-D tipo zócalo, 9 contactos), 4) es el LED de estado, específicos por bus y por productos, 5) el interruptor giratorio RUN/STOP y 6) la interface Ethernet (R145 de 8 contactos, conector tipo zócalo).

**Figura 4.1.** Ubicación de la interface de comunicaciones del controlador CPX-CEC

4.1.1 Interconexión de entradas y salidas

Los módulos de entradas y salidas fueron seleccionados para lograr una comunicación adecuada con los componentes que conforman el sistema de prensado, monitoreando la entrada de datos de los sensores y válvulas, así como para suministrar señales de tensión y corriente para la actuación de los componentes. El sistema de control se enfoca principalmente en las fases de control y actuación del sistema, aún sin las fases de suministro neumático y eléctrico el sistema sería obsoleto ya que no existen terminales de monitoreo y control sobre estas.

En la figura 4.2 se pueden apreciar más detalladamente la distribución de las líneas de datos conectadas desde los componentes a la unidad de control.

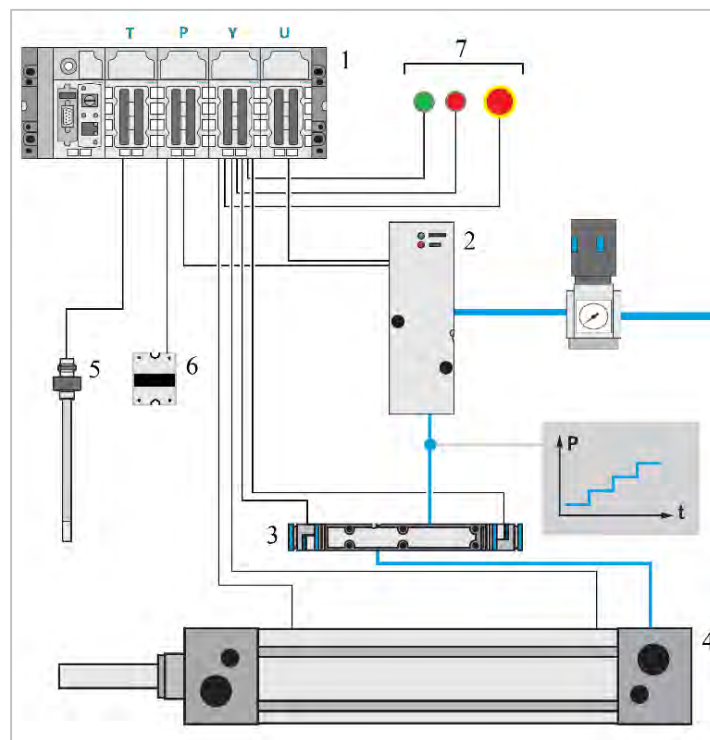


Figura 4.2. Diagrama de interconexión de las entradas y salidas relacionadas a los componentes del sistema 1) Unidad de control CPX-CEC, 2) Válvula proporcional VPPX, 3) Válvula bidireccional JMFH, 4) cilindro de fuerza ADNH, 5) sensor de temperatura PT-100, 6) Relevador de estado sólido y 7) botones de control.

La válvula proporcional (2) al igual que el relevador de estado sólido (6) utilizan señales analógicas para su funcionamiento, ambos se conectan al módulo P que envía señales analógicas de tensión (0-12 VCD) o corriente (4-20 mA). La unidad de control, por medio del módulo de salidas analógicas, manda una señal de aumento proporcional hacia el relevador de estado el cual conmuta la tensión en CA que reciben los cartuchos térmicos para el calentamiento de acuerdo a la magnitud

de la señal que recibe. La válvula proporcional recibe la señal de salida del módulo, la cual interpreta su control integrado comparando el valor que recibe, trata de igualarlo resultando en un aumento proporcional de la presión neumática; simultáneamente, la válvula envía una señal analógica de corriente (4-20 mA) al módulo de entradas analógicas U, con el fin de monitorear el aumento de la presión neumática.

Al módulo Y, el cual consta de 8 entradas y 8 salidas digitales, se conectan los sensores de posición del cilindro de fuerza ADNH (4), las bobinas magnéticas de la válvula piloto JMFH (3) y los botones de control (7). Este módulo es el más activo debido a la cantidad de componentes conectados a él. Los sensores de posición sólo envían señales de abierto/cerrado para notificar al controlador la posición actual del vástago del cilindro, con el objeto de controlar la salida de señales hacia las bobinas magnéticas de la válvula bidireccional; el módulo recibe señales de pulso de los botones de control de inicio, paro y paro de emergencia, manteniendo una interacción con los dos primeros controlando su luminosidad para indicar ciertos estados del sistema de prensado.

4.2 Unidad de Organización de Programas (POU)

La programación de la CU fue llevada a cabo por personal de la empresa Festo Pneumatics, esta sección presenta un breve resumen de las partes más importantes de dicha programación para ofrecer al lector una explicación del comportamiento del software. Éste se distribuyó en una configuración de tareas como la que describe la figura 4.3, estableciendo un programa principal y programas esclavos ejecutándose en segundo plano.

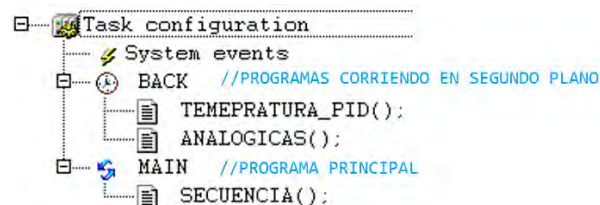


Figura 4.3. Diagrama de árbol de la configuración de tareas.

Los programas se escribieron en distintos lenguajes basados en la norma IEC 61131-3, distribuidos en unidades de organización de programas (POU por sus siglas en inglés) quedando de la siguiente manera.

Las POU son funciones, bloques de funciones y programas que se pueden complementar con acciones. Cada POU consiste en una parte declaratoria (<head>) y un cuerpo (<body>). El cuerpo está escrito en uno de los lenguajes de programación IEC que incluyen IL, ST, **SFC**, **FBD**, **LD** o CFC llamado CoDeSys el cual soporta todos los POU que utilicen el estándar IEC. Un POU

pueden llamar a otros POU, sin embargo, las recursiones no son permitidas. En el código fuente de la interfaz para el control del prototipo, se utilizan las POU: SFC (Sequential Function Chart), FBD (Function Block Diagram) y LD (Ladder Diagram).



Figura 4.4. Lista de secuencias POU que conforman el control del sistema.

4.2.1 Plano Secuencial de Funciones (SFC)

El Plano Secuencial de Funciones (SFC, Sequential Function Chart) es un lenguaje gráficamente orientado el cual hace posible describir el orden cronológico de diferentes acciones dentro de un programa. En éste, las acciones son asignadas a elementos escalón y el procesamiento de la secuencia es controlado por la transición de dichos elementos.

Es un diagrama funcional normalizado, que permite hacer un modelo del proceso a automatizar, contemplando entradas, acciones a realizar y los procesos intermedios que provocan estas acciones. Inicialmente fue propuesto para documentar la etapa secuencial de los sistemas de control de procesos a eventos discretos. Ahora es principalmente utilizado en sistemas secuenciales.

4.2.2 Diagrama de Bloques (FBD)

La programación por Diagrama de Bloques, es un lenguaje gráfico que trabaja con una lista de redes donde cada red contiene una estructura que representa una expresión lógica o aritmética, la llamada de un bloque de funciones, un salto o una instrucción de retorno. Esto permite al usuario construir procedimientos mediante la unión de bloques funcionales prediseñados.

Este lenguaje también describe una función entre las variables de entrada y variables de salida, como un conjunto de bloques elementales, que están conectados por líneas de conexión. Generalmente utilizan símbolos lógicos para representar al bloque de función.

4.2.3 Diagrama de Escalera (LD)

Los LD o Diagramas de Escalera son también un lenguaje de programación gráfico basado en los esquemas eléctricos de control clásicos. El Diagrama de Escalera es adecuado para la construcción de interruptores lógicos, por el otro también se pueden crear redes como en un Diagrama de Bloques (FBD). Por lo tanto, los LD son muy útiles para controlar el llamado de otros POU.

Un LD consiste en una serie de redes, las cuales están limitadas por ambos lados por una línea de corriente vertical izquierda y derecha. En el centro está un diagrama de circuito formado por contactos, bobinas y líneas de conexión.

Cada red consiste en una serie de contactos del lado izquierdo que transmiten de izquierda a derecha el estado “ON” u “OFF”, que representan a los valores booleanos VERDADERO o FALSO. A cada contacto le pertenece una variable booleana. Si esta variable es TRUE, entonces la condición pasa de izquierda a derecha a lo largo de la línea de conexión. De lo contrario, la conexión derecha recibe el valor OFF.

4.3 Ciclo de trabajo

El ciclo de trabajo del sistema de prensado está pensado para la experimentación en el prensado de electrodos porosos, así como la posibilidad de prensado de ensambles membrana electrodo (MEA), siempre considerando la seguridad tanto del usuario como del equipo. Esto significa que todos los parámetros del proceso de prensado pueden ser modificados en magnitud y razón de cambio tanto en aumento como en decremento.

La figura 4.6 describe el diagrama de flujo del sistema de control, el cual está compuesto por 4 programas básicos: REVISION_INICIAL, PLC_PRG, TEMPERATURA_PID Y ANALOGICAS. Los programas TEMPERATURA_PID Y ANALOGICAS son subrutinas “esclavo” de la rutina PLC_PRG, el cual las llama para complementar el control del sistema. Además, una quinta rutina denominada SECUENCIA, llama secuencialmente a las dos rutinas maestras cuando las condiciones de cada una se cumplen, con el objetivo de dar continuidad al sistema de control.

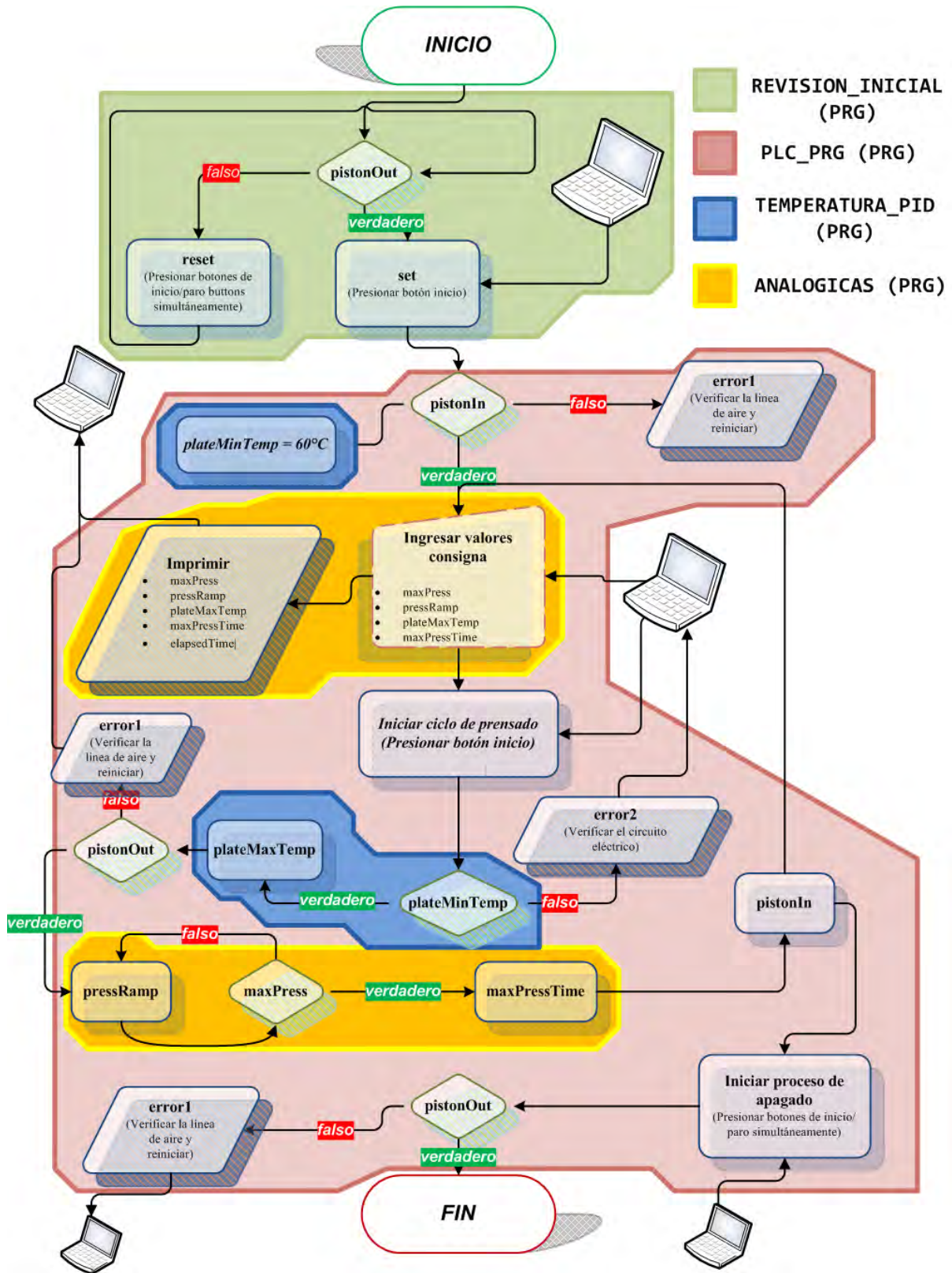


Figura 4.6. Diagrama de flujo del sistema de prensado

4.3.1 Programa REVISION_INICIAL (PRG)

En modo apagado, la prensa siempre estará con el vástago extendido, esto con el fin de evitar expansiones inesperadas del mismo debido a presiones residuales en las cámaras del cilindro. Al encender el sistema, el PLC primero detectará en qué posición se encuentra el vástago, apoyándose de los sensores de posición colocados sobre la carcasa del cilindro al inicio y al final de la carrera. Si la condición *pistonOut* es verdadera, el sistema pasará a la posición *set* y el botón verde del gabinete se encenderá, indicando que el sistema está listo para iniciar. Al presionar el botón verde, el vástago retrocederá y activará la señal *pistonIn*. En caso de que la condición *pistonOut* no se cumpliera, es decir, que el vástago no se encontrara expandido al iniciar el ciclo de encendido, la interfaz gráfica del programa mandará un mensaje de error y los botones *ARRANQUE Y PARO* del gabinete empezarán a parpadear simultáneamente en intervalos de 1 segundo; esto querrá decir que la prensa no se sometió a un ciclo de apagado correcto y que necesita ser reiniciada. Para reiniciar la prensa, se deben presionar ambos botones durante 5 segundos; esto provocará que el cilindro se expanda hasta cumplir la condición *pistonOut* y se contraiga inmediatamente para quedar en la posición *pistonIn*.

4.3.2 Programa PLC_PRG (PRG)

Cuando el cilindro está en la posición *pistonIn*, el PLC envía una señal analógica a las cargas térmicas para aumentar la temperatura de la placa térmica a una temperatura de precalentamiento que por defecto es de 60°C. La temperatura de precalentamiento se definió con el objetivo de reducir la diferencia de temperaturas entre la temperatura inicial y la temperatura consigna a la hora de ejecutar un ciclo de prensado y con eso, reducir el tiempo de precalentamiento.

Paralelamente, en el ordenador, se ingresan los valores consigna a los cuales se llevará a cabo el siguiente ciclo de prensado; se ingresan los valores de presión máxima (*maxPress*), aumento proporcional de la presión (*pressRamp*), temperatura máxima de la placa térmica (*plateMaxTemp*) y tiempo máximo de prensado (*maxPressTime*). Se puede dar inicio al ciclo de prensado ya sea dando click en el botón de inicio en la interfaz o en el botón verde del gabinete directamente.

Ya que se dio inicio al ciclo de prensado, el control verificará primero que la condición de precalentamiento *plateMinTemp* sea verdadera para posteriormente proceder con el aumento de la temperatura máxima de prensado con la expansión del vástago hasta la posición *pistonOut* sin dar inicio a la rampa. Cuando estas condiciones son verdaderas, el controlador accionará la válvula proporcional para desarrollar la rampa de presión definida en los valores consigna hasta llegar a la condición *maxPress*. La VPPX aumentará la presión basada en la secuencia de control descrita en la sección 3.2.1.2.

Cuando la válvula cumple la condición *maxPress*, ésta mantendrá esta presión constante durante el tiempo *maxPressTime* y purgará la presión de avance para llevar al vástago de regreso a la condición *pistonIn*. En ese punto, el usuario puede retirar la muestra de la placa térmica y decidir iniciar un nuevo ciclo de prensado o proceder al ciclo de apagado, que consiste en dejar presionados los botones inicio/paro simultáneamente durante 5 segundos, lo que provocará que el pistón se expanda hasta la condición *pistonOut*. Cumplida esta condición se puede proceder al corte de energía del sistema.

4.4 Interfaz visual generada

La conjugación de los programas antes descritos, se representa en una interface visual amigable con el usuario en la cual se ingresan todos los valores consigna para el ciclo de prensado y se puede controlar el funcionamiento del sistema de prensado sin necesidad de interactuar con los botones del gabinete de control. Además, la unidad de control memoriza los valores consigna ingresados de manera que, si no se tiene conectividad con un ordenador con el programa instalado, se puede iniciar el ciclo de prensado desde los controles del gabinete con los últimos valores ingresados.

La figura 4.7 describe la distribución de la interface visual para el control del sistema de prensado, el cual está dividido en 5 secciones esenciales: control, parámetros de ajuste de presión, parámetros de ajuste de temperatura, grafica de presión y gráfica de temperatura. Adicionalmente, está la sección de representación de posición del cilindro, la cual denota la posición del vástago del cilindro ADN de acuerdo a la señal que recibe de los sensores de posición.

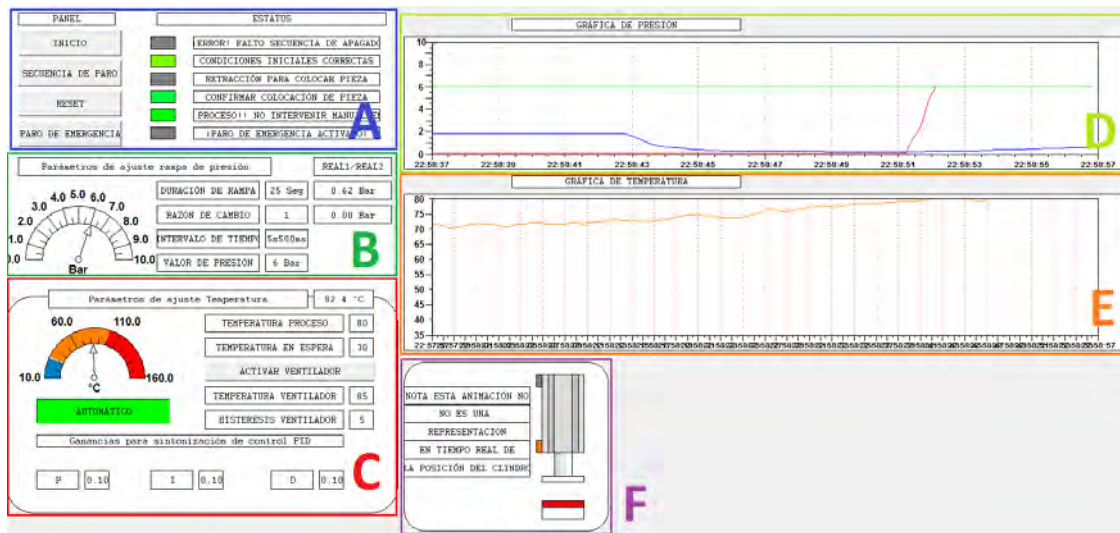


Figura 4.7. Imagen de la interface visual para el control del sistema de prensado dividido en: A) Control, B) Parámetros de ajuste de presión, C) parámetros de ajuste de temperatura, D) gráfica de presión, E) gráfica de temperatura y F) representación en tiempo real de posición del cilindro.

La sección de control (A) es básicamente un panel de control para el manejo de los controles básicos del sistema, es decir, es una representación de los botones de arranque, paro y paro de emergencia, además de mostrar una zona de indicadores que detallan el estatus en el que se encuentra el sistema.

La figura 4.8 muestra más a detalle la distribución de los indicadores y botones, los cuales se llevan a cabo las mismas funciones que los botones instalados en el gabinete, con la ventaja de que no es necesario presionar dos botones simultáneamente, ni mantener pulsado algún botón por un tiempo determinado, lo cual reduce los tiempos de interacción aumentando en cierto porcentaje la productividad, si se diera el caso.

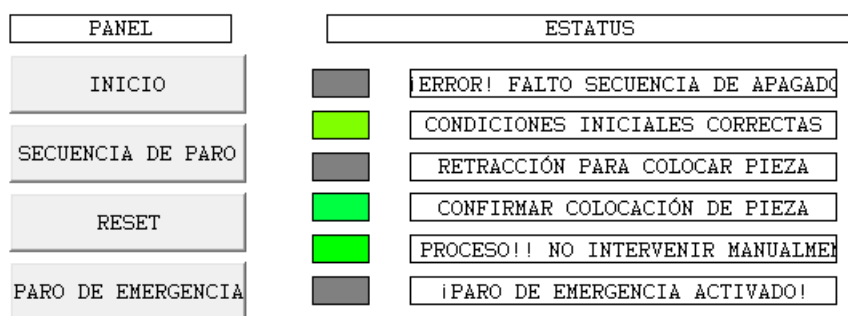


Figura 4.8. Representación de la sección de control de la interfaz visual.

La sección de ajuste de la presión neumática (bar), mostrada en la figura 4.9, sirve para definir los distintos valores de presión necesarios para el ciclo de prensado como: duración en segundos de la rampa de presión, razón de cambio de la presión, tiempo de duración de presión máxima (s y ms) y valor de la presión máxima. Es necesario considerar que, si se define una duración del tiempo de la rampa, la sección de razón de cambio debe permanecer en 1, ahora, si se utiliza la sección de razón de cambio, la sección de duración de rampa deberá ser cero.

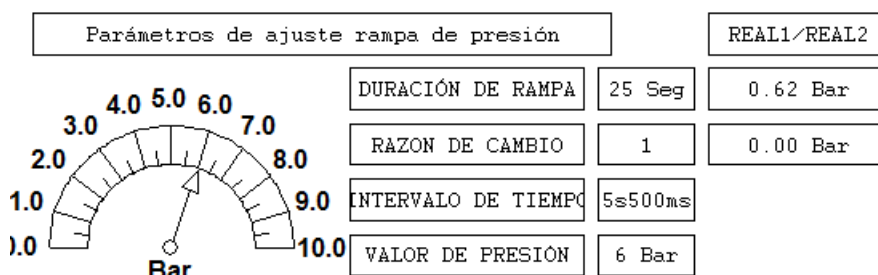


Figura 4.9. Representación de la sección de ajustes de presión de la interfaz de control del sistema de prensado.

Para el control de la temperatura, se deben ingresar valores en la sección C, mostrada en la figura 4.10, los cuales consisten en ingresar la temperatura máxima deseada, la temperatura de precalentamiento y la razón de incremento de la temperatura. Para el caso del aumento de la temperatura, el sistema permite un incremento con control PID o un incremento automático, lo que significa un encendido sin filtrado de la señal de tensión a las resistencias.

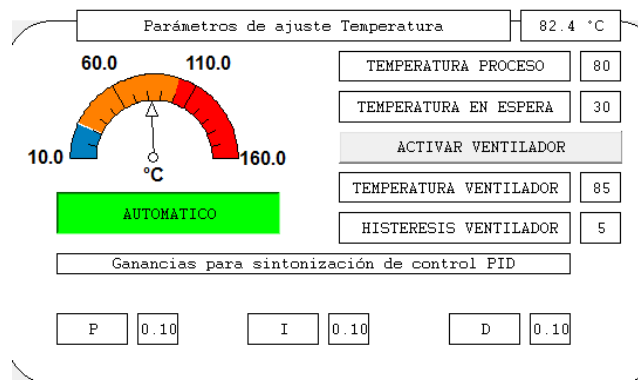


Figura 4.10. Distribución visual de los indicadores y botones de la interfaz de ajuste de la temperatura.

Adicionalmente, el sistema térmico incluye la opción de un sistema de enfriamiento, el cual implica la instalación de un ventilador que induzca convección forzada al módulo térmico ya sea para controlar los picos de temperatura o para reducir relativamente más rápido la temperatura del módulo iniciado el ciclo de apagado. El sistema de enfriamiento puede ser activado manualmente con el botón de activación, o puede ser programado para activarse al llegar a cierta temperatura con una histéresis definible.

Las secciones D y E son las gráficas de presión y temperatura (figura 4.11). Éstas se actualizan cada 500 ms y monitorean las mediciones de presión y temperatura durante el ciclo de prensado. Para el caso de la gráfica de presión, esta lleva a cabo 3 mediciones simultáneamente: la presión máxima definida (línea verde), la presión de la cámara de retroceso (línea azul) y la presión de la cámara de avance (línea roja).

La gráfica de temperatura muestra la medición del sensor PT-100. El sistema monitorea la medición del sensor cada 100 ms y muestra rangos de temperatura de 10 °C a 160 °C. Todos los datos de las gráficas son almacenados en un archivo de valores separados por coma (.csv) el cual es exportado a una carpeta dentro del ordenador. De esta manera los usuarios tienen acceso al registro de los datos de los ciclos de prensado llevados a cabo durante los procesos de experimentación. Cabe mencionar que esos archivos no son guardados automáticamente por el programa.

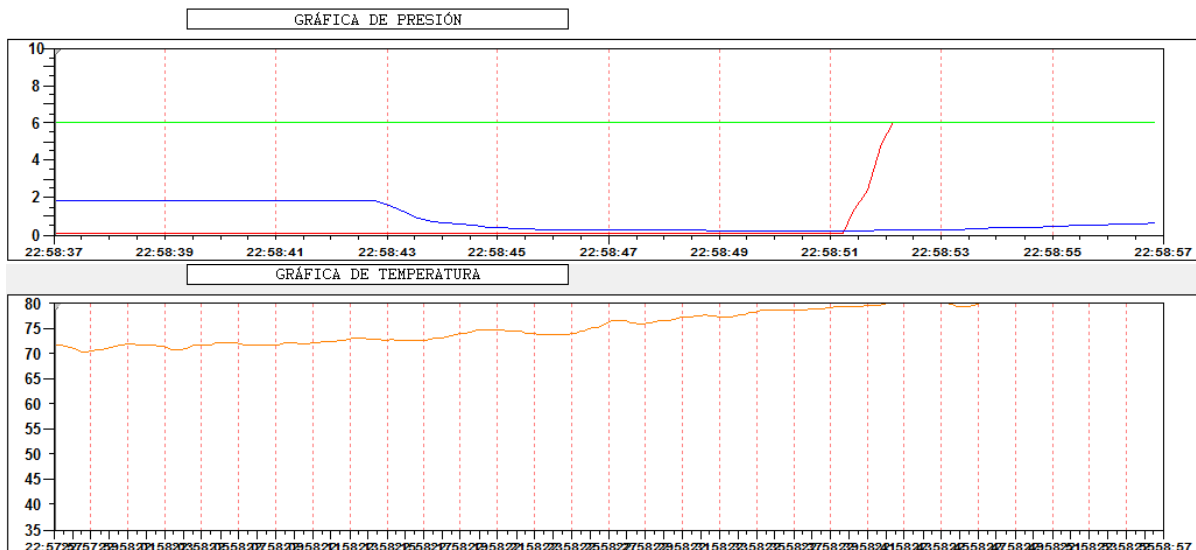


Figura 4.11. Representación de las gráficas de presión y temperatura en la interface visual del sistema de control. En a) se mide la presión en bar respecto al tiempo transcurrido y b) la temperatura respecto al tiempo transcurrido

4.5 Integración física del sistema

Ya desarrollado en su totalidad el sistema de control, se procedió a integrar todos los componentes para las pruebas preliminares. Se conectó un compresor a la entrada de la unidad de mantenimiento y se hicieron las conexiones de las líneas neumáticas hacia el cilindro de fuerza. De manera temporal se utilizó uno de los cartuchos térmicos, sumergido en agua junto con el sensor de temperatura PT-100 para comprobar el funcionamiento del sistema de calentamiento.

En la figura 4.12, se puede apreciar una instalación preliminar del sistema de prensado: cilindro de fuerza ADN H, con sus dos sensores de posición SMT, representación del módulo térmico con un cartucho térmico Baker y el sensor de temperatura PT-100, y el gabinete de control conteniendo todos los componentes.



Figura 4.12. Imagen del cilindro montado en las placas superior e intermedia de la armadura de soporte.

Cabe mencionar que el sistema se encuentra construido en un 80% de su totalidad, que consiste en el ensamblado e instalación del gabinete de control, la fuente de suministro de flujo de trabajo y el cilindro de fuerza. Además, se utilizó un elemento resistivo convencional sumergido en agua junto con el sensor de temperatura con el objetivo de monitorear la temperatura. Este arreglo es suficiente para llevar a cabo pruebas preliminares del sistema de control. El 20% restante consiste en la implementación del módulo térmico, sin embargo, éste componente no impidió que se llevaran a cabo pruebas de funcionamiento satisfactorias.

CONCLUSIONES

Se llevó el análisis del mercado en busca de una empresa que se hiciera cargo de la manufactura integral del sistema de prensado y enfocar este trabajo al análisis micro-estructural de los electrodos fabricados en ella, sin embargo, la única empresa con la capacidad de construir un prototipo con las especificaciones necesarias, cotizaba su equipo en USD \$80,000.00 aproximadamente, por lo que se decidió enfocar este trabajo en lograr el diseño, validación y manufactura del sistema, lo cual representó una reducción del costo en un 80% ya que se obtuvo un sistema con un costo aproximado de USD \$10,000.00.

El diseño contempló la simulación de la distribución de esfuerzos y temperatura, en el software Solidwoks. Con esta simulación se determinaron de manera numérica los esfuerzos mecánicos máximos de la estructura, para prevenir fallas de acuerdo al límite de tracción del material durante el ciclo de fuerza.

Las cajas maquinadas en las placas intermedia y superior, fueron fijadas de tal forma que se obtuviera una extensión adicional de 0.5mm en cada arista, lo cual permitió un ensamble adecuado sin mayores complicaciones. El material del que están fabricadas, necesita tratamiento anticorrosión, pues la generación descontrolada de óxido podría derivar en la contaminación de las muestras

Se utilizaron tuercas para sujetar cada placa de soporte en el espárrago sinfín con el objetivo de no transmitir ningún esfuerzo por compresión a la carcasa del cilindro, ya que la compresión generada por el apriete de las tuercas exteriores podría llegar a dañar los empaques del mismo. Cabe mencionar, que el margen de seguridad contemplado para la cédula de las placas garantiza el soporte mecánico.

El control fue programado en la unidad CPX-CEC de la marca FESTO, el cual utiliza un entorno de desarrollo CoDeSys. Los módulos de entradas y salidas, digitales y analógicas, permiten la correcta operación de la prensa, el monitoreo y la actuación de los componentes.

Concluida la etapa de programación de la unidad de control, se procedió a hacer pruebas de los ciclos de fuerza y temperatura, especificando aumentos proporcionales tanto de presión neumática como de corriente hacia una resistencia eléctrica. Se definieron valores fijos para el control PID de la temperatura (valor 1) y se definió una rampa de la presión neumática de 5 bar/s a una presión máxima de 5 bares y un tiempo de 5 s a presión máxima. Los resultados se mostraron en las curvas de presión y temperatura de la interfaz visual. Por otro lado, se observó que al ingresar el valor 1 en todas las magnitudes del control PID, no fue posible controlar la estabilidad del sistema térmico una vez alcanzada la temperatura máxima definida en los ciclos preliminares. Debido a esto se definió una magnitud del valor derivativo de 0.1, ya que éste es una variable compuesta por la relación del valor integrativo, entre el valor derivativo. Con este procedimiento, se logró estabilizar la temperatura máxima, reduciendo el error de aumento de la rampa de 10 °C a $\pm 3^\circ\text{C}$. Estos resultados del control de temperatura, se llevaron a cabo en agua, con el único objetivo de comprobar el funcionamiento del sistema de control.

Las pruebas de funcionamiento validan el correcto funcionamiento del sistema, de acuerdo a los rangos de operación preestablecidos para realizar ensambles membrana-electrodo y pequeños stacks de celdas de combustible.

PERSPECTIVAS

Actualmente el sistema de prensado se encuentra en la etapa final de construcción. Queda pendiente el maquinado de la placa inferior y los componentes del módulo térmico (Soporte de punzón, punzón y placa térmica), con esto se podrá llevar a cabo procesos de manufactura de electrodos.

Se considera el rediseño de todas las placas que conforman la armadura de soporte, considerando un material más ligero, pero con propiedades mecánicas afines. Esto con la finalidad de mejorar la portabilidad del sistema, además de dar un acabado más estético.

Se trabajará en perfeccionar la impresión de resultados obtenidos a través de la interfaz de usuario, para maximizar la obtención de datos y perfeccionar los resultados obtenidos en la fabricación de los electrodos. Específicamente, se trabajará en corregir errores de monitoreo de presión y control de la temperatura independiente al de las rampas de presión.

Finalmente, ensamblada la prensa, se procederá al desarrollo de MEAs para la validación de su microestructura a través de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Esta validación se realizará bajo las mismas condiciones de frontera con el objetivo de comprobar una uniformidad en la formación de la microestructura del electrodo sometido a un mismo proceso mecánico-térmico.

ANEXOS

Anexo 1

[Plano 1 → Placa superior](#)

[Plano 2 → Placa intermedia](#)

[Plano 3 → Placa inferior](#)

[Plano 4 → Módulo térmico](#)

[Plano 5 → Ensamble del prototipo](#)

[Anexo 2 → Algoritmo para maquinado en CNC Kimitsu](#)

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gallardo, Jorge Raúl Perez, Ecodesign of a large-scale photovoltaic (PV) systems with multi-objective optimization and Life-Cycle Assessment (LCA), Toulouse: Institut National Polytechnique de Toulouse, 2013.
- [2] G. Luna-Sandoval, et al, «Hydrogen Fuel Cell Design and Manufacturing Process Used for Public Transportation in Mexico City,» *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. 3, p. 6, 2011.
- [3] Yong-Hun Cho, et al, «Effect of platinum amount in carbon supported platinum catalyst on performance of polymer electrolyte membrane fuel cell,» *Journal of Power Sources*, vol. 172, pp. 89-93, 2007.
- [4] Romeli Barbosa, et al, «Multiscale relationship of electronic an ionic conduction efficiency in a PEMFC catalyst layer,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 10.1016/j.ijhydene.2016.04.071, 2016.
- [5] Wenming Liu, et al, «Performance improvement of the open-cathode proton exchange membrane fuel cell by optimizing membrane electrode assemblies.,» *International journal of hydrogen energy*, vol. 40, pp. 7159-7167, 2015.
- [6] Romeli Barbosa, et al, «Stochastic reconstruction and a scaling method to determine effective transport coefficients of a proton exchange embrane fuel cell catayst layer,» *Science Direct*, vol. Power Sources 196, pp. 1248-1257, 2011.
- [7] Xiaolu Liang, et al, «A modified decal method for preparing the membrane electrode assembly of proton exchange membrane fuel cells,» *Fuel*, vol. 139, pp. 393-500, 2015.
- [8] Yuzhen Xia, et al, «Development of half-cells with sulfonated Pt/Vulcan catalyst for PEM fuel cells.,» *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 724, pp. 62-70, 2014.
- [9] Haining Na, et al, «Structure and properties of electrospun poly(vinylidene fluoride)/polycarbonate membranes after hot-press. Journal of applied polymer,» *Journal of applied polymer*, vol. 122, pp. 774-781, 2011.
- [10] D. DeBonis, et al, «Analysis of mechanism of Nafion® conductivity change due to hot pressing treatment,» *Science Direct*, vol. Renewable Energy 89, pp. 200-206, 2016.
- [11] T. P. G. & Co.KG, «TOX® PRESSOTECHNIK,» [En línea].
- [12] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, México D.F.: Mc Graw Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V., 2008.
- [13] Bethune, James D., Engineering Design and Graphics with SolidWorks, Boston: Prencice Hall, 2010.
- [14] Yunus A. Cengel, et al, Transferencia de calor y masa 4ª ed., Mexico D.F.: McGraw Hill, 2011.
- [15] «Festo Pneumatics,» Festo AG & KG, [En línea]. Available: www.festo.com/net/es-mx_mx/SupportPortal/. [Último acceso: agosto 2015].