



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA – DISEÑO MECÁNICO

POTENCIAL DEL PERÓXIDO DE HIDRÓGENO PARA EL ACCIONAMIENTO DE
UN EXPANSOR ROTATORIO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. JULIO ADRIÁN AGUILAR TADEO

TUTOR PRINCIPAL
Dr. RICARDO CHICUREL UZIEL
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F., NOVIEMBRE 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Vicente Borja Ramírez
Secretario: Dr. Alvaro Ayala Ruíz
Vocal: Dr. Ricardo Chicurel Uziel
1 er. Suplente: M.I. Germán Jorge Carmona Paredes
2 d o. Suplente: Dr. Rodolfo Zanella Specia

**Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA,
FACULTAD DE INGENIERÍA.**

TUTOR DE TESIS:

Dr. Ricardo Chicurel Uziel

FIRMA

DEDICATORIA

AL PROGRESO DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México brindarme una preparación profesional de primer nivel.

A CONACYT por el apoyo otorgado para la realización de este estudio.

Al Instituto de Ingeniería por el apoyo y las facilidades brindadas para la realización de este estudio.

A la División de Posgrado de la Facultad de Ingeniería por brindarme una educación profesional de primer nivel.

Al taller de Electromecánica del Instituto de Ingeniería por facilitarme sus instalaciones para realizar el proyecto.

Al taller Mecánico del Instituto de Ingeniería por el apoyo en el proyecto.

A el asesor principal de esta tesis el Dr. Ricardo Chicurel Uziel por compartir un poco de su amplio conocimiento conmigo.

Al Ing. Ernesto Terrazas Aguilera por el apoyo y las asesorías durante el proyecto.

A Germán Carmona, Alejandro González, Rodolfo Peters, Filiberto Gutierrez, Joaquín Olivera y Enrique Munive por las asesorías en el proyecto.

A mis amigos del posgrado, Vanessa, Roberto y Miguel. Espero seamos amigos para toda la vida.

Y por último gracias a mis padres y mi hermano, porque sin su apoyo no lo hubiera logrado.

RESUMEN

Se presenta una recopilación del trabajo hecho en el proyecto del expansor rotatorio, desde el inicio en la década de los 1970 a la década de 2010.

Se realizaron pruebas de inyección de peróxido de hidrógeno en una cámara de volumen fijo. Se diseñó y fabricó un banco de pruebas para realizar el experimento. El banco de pruebas consiste de tres sistemas; éstos son: inyección, instrumentación y adquisición de datos.

Se analizan los resultados de las pruebas para conocer la cantidad de peróxido de hidrógeno inyectado que reacciona y la energía de la reacción.

El análisis de las pruebas muestra que sólo el 10% del peróxido de hidrógeno inyectado reacciona. La presión en la cámara catalítica debida a los gases de la reacción, alcanzó un valor máximo de 80 psi, dicha presión puede impulsar el expansor; sin embargo, el tiempo en que se alcanza dicho valor limita al expansor a una velocidad de rotación lenta.

ABSTRACT

A compilation of the work made on the rotary expander project is presented, since the beginning of the project in the decade of 1970 until the decade of 2010.

Tests consisting in injection of hydrogen peroxide into a chamber containing a catalyzer, were carried out. A test workbench was built for this experiment. This workbench consist of three systems that are: injection, instrumentation and data aquisition.

The results of the experiment were analyzed in order to know the amount of hydrogen peroxide that reacts and the energy of the reaction.

The analisis of the tests shows that only 10% of the hydrogen peroxide injected reacts. The preassure in the catalytic chamber due to the reaction gases reached a maximum value of 80 psi, that preassure can propel the expander; however, the lapse in which that value is reached, limits the expander to a slow rotation speed.

Contenido

RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	5
1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 ALCANCE DEL TRABAJO	10
1.2 ORIGEN DEL PROYECTO DEL MOTOR ROTATORIO.....	10
1.1.1 Primeras Versiones del Motor Rotatorio.....	10
1.1.2 Pruebas en un Motor de Vapor.....	12
1.3 REANUDACIÓN DEL PROYECTO DEL EXPANSOR ROTATORIO.....	14
1.2.1 Vinculación con la Iniciativa Privada	14
1.2.2 Diseño y Fabricación de un Nuevo Motor Rotatorio	14
1.4 USO DE LA REACCIÓN CATALÍTICA DEL PERÓXIDO DE HIDRÓGENO COMO FUENTE DE ENERGÍA.....	14
1.3.1 Desarrollo Histórico	14
1.3.2 Reacción Catalítica del Peróxido de Hidrógeno.....	15
1.3.3 Ventajas del uso del Peróxido de Hidrógeno en un Expansor Rotatorio.....	15
1.3.4 Pruebas de Reacción de Peróxido de Hidrógeno Realizadas por González Calderón	16
2 CARACTERISTICAS DE LA VERSIÓN ACTUAL DEL EXPANSOR ROTATORIO.....	17
2.1 DISEÑO DEL EXPANSOR ROTATORIO	18
2.2 CICLO DE FUNCIONAMIENTO DEL EXPANSOR ROTATORIO.....	20
2.3 VARIANTES DE LOS SISTEMAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE	21
2.3.1 Admisión Controlada con Válvula Rotatoria y Escape Axial	21
2.3.2 Admisión Controlada por Válvula Reciprocante y Escape Radial a través de los Rotores... ..	22
3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE INYECCIÓN DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO.....	23
3.1 DISEÑO CONCEPTUAL DEL BANCO DE PRUEBAS.....	24
3.2 MODIFICACIONES DE ELEMENTOS PREVIOS PARA INTEGRACIÓN AL BANCO DE PRUEBAS.	24
3.2.1 Inyector para el Motor Rotatorio y Modificaciones	24
3.2.2 Modificaciones al Cámara Catalítica de González Alejandro.....	27
3.3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL SISTEMA DE INYECCIÓN	29
3.4 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN	32

3.4.1 Sensores.....	32
3.4.2 Acondicionador de Señal para el Sensor de Temperatura.....	34
3.4.3 Acondicionador de Señal para el Sensor de Presión de Inyección.....	35
3.4.4 Acondicionador de Señal para el Sensor de Posición	35
3.4.5 Circuito de Control de la Válvula Solenoide.....	36
3.2.5 Diseño y Elaboración del Sistema de Adquisición de Datos	39
4 PRUEBAS DE INYECCIÓN.....	43
4.1 METODOLOGÍA DE LAS PRUEBAS.....	44
4.2 PRUEBAS CON LA CÁMARA A TEMPERATURA AMBIENTE.....	45
4.3 PRUEBAS CON LA CÁMARA CALIENTE	47
4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
4.5 FACTIBILIDAD DE INYECCIÓN DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO EN EL EXPANSOR ROTATORIO.....	52
5 CONCLUSIONES	57
5.1 CONCLUSIONES GENERALES	58
5.2TRABAJO A FUTURO Y RECOMENDACIONES	59
Referencias.....	60
ANEXO.....	61
GRÁFICAS DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE INYECCIÓN DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO	61
Prueba 1 con la Cámara a Temperatura Ambiente.....	62
Prueba 2 con la Cámara a Temperatura Ambiente.....	64
Prueba 1 con la Cámara Caliente	66
Prueba 2 con la Cámara Caliente	68

1 INTRODUCCIÓN



1.1 ALCANCE DEL TRABAJO

Se realiza una recopilación los trabajos realizados en el proyecto del expansor rotatorio, desde la década de los 1970's hasta la década de 2010.

Se realizán pruebas de inyección de peróxido de hidrógeno en una cámara de volumen fijo. Para tal motivo se diseñó y fabricó un banco de pruebas. El banco de pruebas consiste de tres sistemas, los cuales son: inyección, instrumentación y adquisición de datos.

Se analizán los resultados de las pruebas para conocer la cantidad de peróxido de hidrógeno inyectado que reacciona y la energía de la reacción.

Con base en los resultados de los cálculos, se analiza la posibilidad de accionar el expansor rotatorio inyectando directamente en su cámara de trabajo el peróxido de hidrógeno atomizado.

1.2 ORIGEN DEL PROYECTO DEL MOTOR ROTATORIO

1.1.1 Primeras Versiones del Motor Rotatorio

Debido a las ventajas que presentan los motores rotatorios en comparación con los motores de pistones reciprocantes, en la década de 1970, con base en el diseño propuesto por el Dr. Ricardo Chicurel Uziel (Chicurel, DEVELOPMENT OF A NOVEL ENGINE, 1979) se inicia el desarrollo de un motor rotatorio. El motor consiste de cuatro elementos de la misma geometría los cuales se tocan en sus periferias y al girar en el mismo sentido y a la misma velocidad forman una cámara que varía su volumen. Los elementos giratorios, llamados rotores, se encuentran en medio de dos discos fijos que sirven como soporte a los ejes de los rotores y tapas laterales para la cámara.

Los objetivos que se buscaban en el proyecto eran: (Chicurel, DEVELOPMENT OF A NOVEL ENGINE, 1979):

1. Bajo consumo específico de combustible.
2. Reducir las emisiones contaminantes.
3. Alta relación potencia/peso.
4. Construcción y mantenimiento simples.
5. Vibración y ruido mínimos.
6. Durabilidad.

Se propusieron tres ciclos diferentes para el funcionamiento del motor: ciclo Otto, ciclo Rankine y ciclo Brayton.

En el motor de ciclo Otto los perfiles de los rotores consistían de cuatro arcos de 90° , dos con radio R y dos con radio r . La geometría del perfil de los rotores se puede apreciar en la figura 1.1. En esta versión del motor, dos de los rotores tenían ductos que iban del eje de rotación a uno de los extremos, con la finalidad de permitir la entrada de la mezcla combustible. Los otros dos rotores tenían ductos dispuestos de igual manera pero éstos permitían el escape de los gases de combustión.

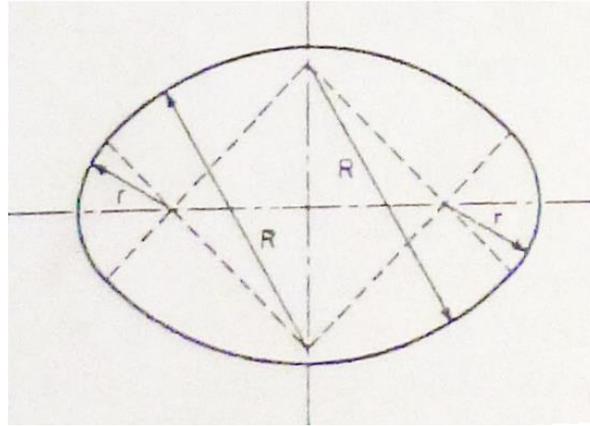


Figura 1.1 Geometría de los rotores del motor de ciclo Otto (Chicurel, DEVELOPMENT OF A NOVEL ENGINE, 1979)

En el motor de ciclo Rankine, el radio r del perfil de los rotores es igual a cero; lo cual genera rotores con puntas. La geometría del perfil de los rotores se puede apreciar en la Figura 1.2. En esta versión del motor, dos de los rotores son utilizados para permitir el ingreso de gas a presión en la cámara de expansión y dos de ellos son utilizados para permitir el escape del gas expandido; con esta configuración se logra obtener dos impulsos por cada revolución del eje de salida.

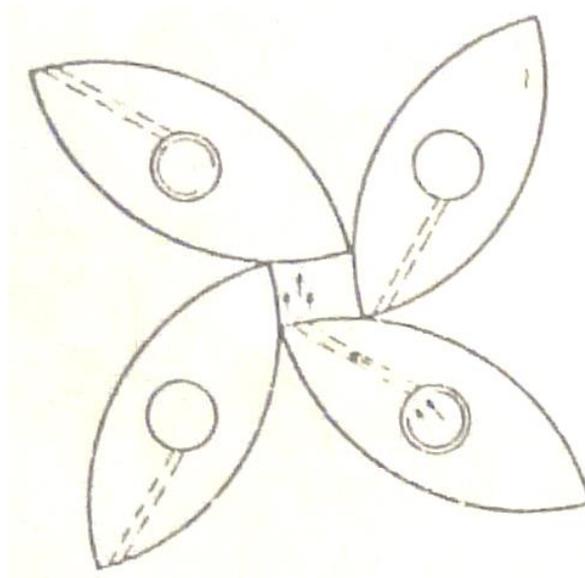


Figura 1.2 Rotores con punta (Chicurel, DEVELOPMENT OF A NOVEL ENGINE, 1979)

En el motor de ciclo Brayton, los rotores tienen la misma geometría que los rotores del motor de ciclo Rankine. Para esta versión, uno de los rotores es utilizado para permitir el ingreso del aire a la cámara, el segundo permite que el aire comprimido pase a una cámara de combustión externa, el tercer rotor permite el paso de los gases de combustión a la cámara de expansión y el último rotor permite el escape de los gases de combustión expandidos. En la figura 1.3 podemos apreciar un esquema del sistema.

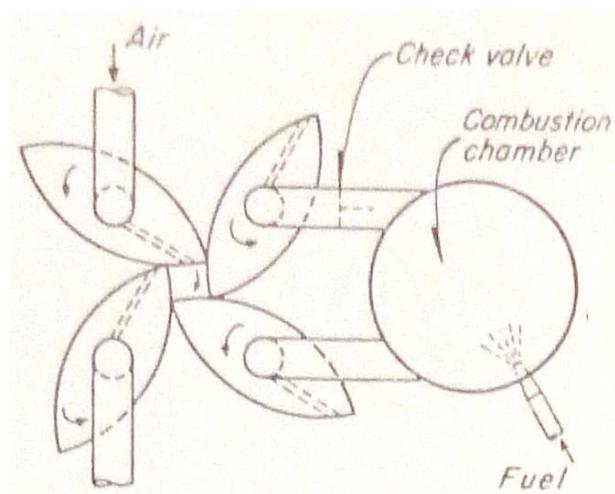


Figura 1.3 Configuración del motor rotatorio ciclo Brayton (Chicurel, DEVELOPMENT OF A NOVEL ENGINE, 1979)

El motor de ciclo Otto fue construido y sometido a pruebas. Los resultados de las pruebas demostraron que el motor podía operar bajo el ciclo Otto. El principal problema que presentó fueron las fugas de la cámara de expansión; otro problema encontrado fue cómo proveer una respiración del motor adecuada. La figura 1.4 muestra una fotografía del ensamble parcial del motor.

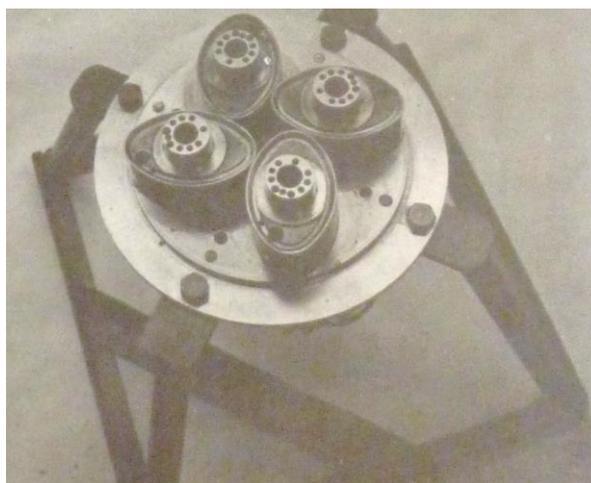


Figura 1.4 Ensamble parcial del motor rotatorio de ciclo Otto (Chicurel, DEVELOPMENT OF A NOVEL ENGINE, 1979)

1.1.2 Pruebas en un Motor de Vapor

Se construyó un motor rotatorio de vapor ciclo Rankine para realizar pruebas y evaluar sus características. Las pruebas se realizaron impulsando al motor con aire comprimido que provenía de un tanque de almacenamiento, el cual tenía una presión promedio de 8 Kg/cm².

La finalidad de las pruebas fue conocer la potencia del motor. Para realizar las pruebas, la flecha de salida del motor estaba acoplada a un volante de inercia. Se tomaron mediciones de la velocidad angular del volante de inercia a intervalos de tiempo constantes. Se determinaron las pérdidas debidas a la fricción en las chumaceras y al rozamiento del volante con el aire.

En esas pruebas se tomó registro de la presión en la cámara de expansión y en el múltiple de admisión. Con la información de la presión dentro de la cámara y la velocidad del motor, se obtuvieron las curvas de presión contra volumen de la cámara. Las curvas presión-volumen se utilizaron para conocer el trabajo indicado del motor.

Para medir el gasto másico de aire, se colocó una placa de orificio y un manómetro diferencial de mercurio. Entre el medidor de flujo y el motor se encontraba un tanque de almacenamiento con la finalidad de mantener la presión constante en el suministro de aire y amortiguar las pulsaciones debidas a la apertura y cierre de la válvula de admisión. En la figura 1.5 podemos apreciar una fotografía de las pruebas realizadas al motor de vapor.

Se compararon los resultados de las pruebas con los valores teóricos calculados y se llegó a las siguientes conclusiones: (Chicurel, PRUEBAS DINAMOMÉTRICAS DE UN MOTOR ROTATORIO DE VAPOR, 1980)

- 1) Caída de presión muy alta entre el múltiple de admisión y la cámara de expansión.
- 2) Caída rápida de presión dentro de la cámara después del cierre de las válvulas de admisión como consecuencia de las fugas por los claros existentes entre los rotores, y entre los rotores y tapas.
- 3) Consumo de aire elevado.

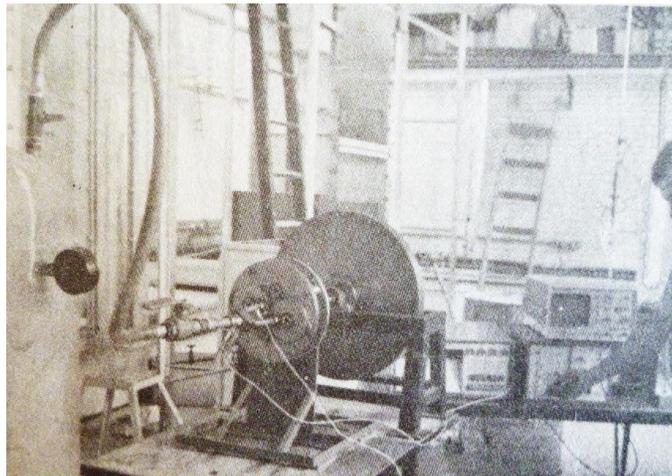


Figura 1.5 Pruebas en un motor de vapor (Chicurel, PRUEBAS DINAMOMÉTRICAS DE UN MOTOR ROTATORIO DE VAPOR, 1980)

1.3 REANUDACIÓN DEL PROYECTO DEL EXPANSOR ROTATORIO

1.2.1 Vinculación con la Iniciativa Privada

Después de un largo periodo de tiempo en el que no se realizó trabajo en el expansor rotatorio, el proyecto es retomado debido al interés del Ing. Ernesto Terrazas Aguilera. Dicho interés recae en la posibilidad de impulsar el motor utilizando la energía producida por la reacción catalítica del peróxido de hidrógeno en alta concentración.

El Ing. Terrazas diseña e implementa un proceso para concentrar peróxido de hidrógeno, logrando obtener concentraciones de 98 %. Para realizar dicho proceso se utiliza energía renovable y además si consideramos que los productos de la reacción del peróxido de hidrógeno no son contaminantes, podemos considerar a éste una fuente de energía sustentable.

1.2.2 Diseño y Fabricación de un Nuevo Motor Rotatorio

El proyecto se reanuda como tesis de doctorado del González Calderón (González, 2013) bajo la tutela del Dr. Ricardo Chicurel. En dicha tesis se realiza la evaluación teórica del ciclo de trabajo del motor, se hace una revisión del diseño, se fabrica un prototipo de pruebas y se realizan pruebas para evaluar el desempeño del motor. En este mismo trabajo, se diseña y construye un dispositivo para hacer pruebas de la reacción catalítica del peróxido de hidrógeno; sin embargo, los resultados de estas pruebas no son favorables.

Posteriormente se inicia una tesis de maestría (Cárdenas, 2013), la cual consistió en realizar la instrumentación del motor y realizar algunas pruebas.

1.4 USO DE LA REACCIÓN CATALÍTICA DEL PERÓXIDO DE HIDRÓGENO COMO FUENTE DE ENERGÍA

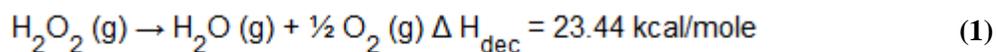
1.3.1 Desarrollo Histórico

Historicamente, el uso de la reacción catalítica del peróxido de hidrógeno de alta concentración como fuente de energía se remonta a la segunda guerra mundial. Las primeras aplicaciones de éste fueron como propelente de misiles alemanes. Posteriormente fue utilizado para impulsar los torpedos de los submarinos rusos. Actualmente es utilizado para impulsar turbobombas de vehículos espaciales, bicicletas y rotores de helicópteros. (US Peroxide, 2013) (<http://www.hydrogencarsnow.com>, 2012) (<http://www.youtube.com>, 2012) (<http://www.youtube.com>, 2012)

Otra de las aplicaciones actuales del peróxido de hidrógeno es como propelente en cinturones cohete (*rocket belt*). En dichos dispositivos el peróxido de hidrógeno es empujado por un gas a presión para que pase del recipiente que lo contiene hacia una cámara en donde se encuentra el catalizador; al entrar en contacto ambos, el peróxido se disocia. Los productos de la reacción escapan por toberas, generando así el impulso necesario para elevar el cinturón cohete y al piloto. (<http://es.wikipedia.org>, 2012)

1.3.2 Reacción Catalítica del Peróxido de Hidrógeno

El peróxido de hidrógeno está compuesto por dos átomos de oxígeno y dos átomos de hidrógeno. Este compuesto es inestable en condiciones ambientales normales y se descompone generando agua y oxígeno. El estado físico del agua que resulta de la descomposición del peróxido de hidrógeno depende de las condiciones de ésta; si el peróxido se descompone en condiciones ambientales normales, el estado del agua resultante será líquido. Si el peróxido se descompone en presencia de un catalizador el estado del agua será gaseoso. A continuación se muestra la fórmula que describe la reacción catalítica del peróxido de hidrógeno, la ecuación que se presenta en la figura 1.6 será nombrada en este texto como ecuación (1).



W.C. Schumb, C.N. Satterfield, R.L. Wentworth. *Hydrogen Peroxide*, ACS Monograph, Reinhold Publishing, pg. 251 (1955).

Figura 1.6 Calor de descomposición del peróxido de hidrógeno (USPeroxide, 2013)

Como se aprecia en la fórmula anterior, la descomposición catalítica del peróxido de hidrógeno libera energía. Teniendo una reacción suficientemente rápida, la energía liberada puede ser utilizada para impulsar una máquina mediante inyecciones directamente en la cámara de trabajo.

La velocidad de la reacción depende del tipo de catalizador. Otro factor que influye en la velocidad de la descomposición es la temperatura. A bajas temperaturas el peróxido de hidrógeno se descompone lentamente; conforme se aumenta la temperatura, la velocidad de descomposición también aumenta.

1.3.3 Ventajas del uso del Peróxido de Hidrógeno en un Expansor Rotatorio

El peróxido de hidrógeno de alta concentración puede ser inyectado directamente en la cámara de trabajo del expansor. La cámara podría contener el catalizador que active la descomposición del peróxido de hidrógeno. Al disociarse el peróxido de hidrógeno genera vapor de agua y oxígeno a alta temperatura, la expansión de estos gases se puede aprovechar para mover el expansor.

Esta manera de utilizar dicha reacción tiene la ventaja de que no se debe aspirar gas hacia la cámara; por lo tanto se elimina el sistema de admisión de la máquina. Lo anterior simplifica el diseño del expansor. La admisión de gas en la cámara de un expansor está limitada por el tiempo de apertura de la válvula de admisión y por la fricción del gas en los conductos que comunican con la cámara; si se inyecta el peróxido líquido directamente en la cámara, se eliminan estos problemas.

Los productos de la reacción del peróxido de hidrógeno no son dañinos para el medio ambiente, además elementos químicos que componen a éste son muy abundantes. El proceso para la concentración del peróxido de hidrógeno se puede realizar utilizando energías renovables. Tomando en cuenta los puntos anteriores, el peróxido de hidrógeno se considera como almacén de energía sostenible.

1.3.4 Pruebas de Reacción de Peróxido de Hidrógeno Realizadas por González Calderón

Dentro del trabajo de tesis doctoral de González (González, 2013), se realizaron pruebas de inyección de peróxido de hidrógeno en una cámara de volumen fijo que contenía una sustancia para descomponer el peróxido de hidrógeno.

Las pruebas se realizaron en una cámara de volumen fijo. El cuerpo de la cámara se fabricó a partir de una barra de sección transversal circular con diámetro de 89 mm. Los componentes de la cámara son: tapa superior (A en figura 1.7), tapa inferior (B en figura 1.7), cuerpo (C en figura 1.7) y recipiente (no se aprecia en la figura 1.7). En el recipiente se colocaron perlas de permanganato de potasio, y a su vez el recipiente se colocó dentro de la cámara. En la tapa superior, mediante una rosca, se acopló una válvula de retención que permitía el flujo sólo hacia el interior de la cámara. A la válvula se acopló una jeringa con la cual se inyectó el peróxido de hidrógeno. En la tapa inferior se acopló un sensor de presión dinámico y una llave de paso para liberar el gas de la cámara. Las tapas se fijaron a la cámara con 4 espárragos que atraviesan longitudinalmente la cámara y las tapas. La figura 1.7 muestra el equipo utilizado para realizar dichas pruebas.

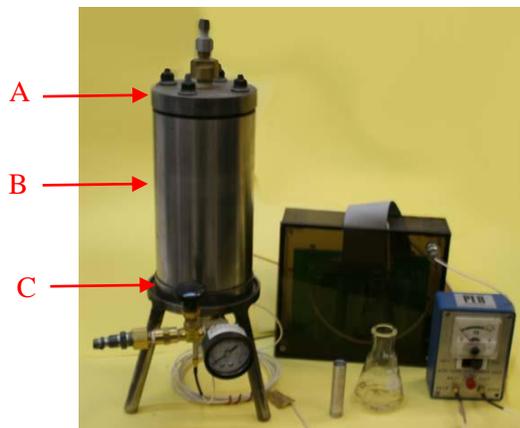


Figura 1.7 Equipo utilizado para pruebas de inyección de peróxido (González, 2013)

El registro de la presión dentro de la cámara se realizó con una tarjeta de adquisición de datos PCI y un programa elaborado en el software LabVIEW.

Los resultados de las pruebas mostraron que la presión dentro de la cámara incrementó después de transcurrido 1 segundo o más. El tiempo que tardó en incrementar la presión dentro de la cámara era demasiado grande para impulsar al expansor a una velocidad de rotación práctica, por lo que ya no se realizaron más pruebas.

2 CARACTERISTICAS DE LA VERSIÓN ACTUAL DEL EXPANSOR ROTATORIO



2.1 DISEÑO DEL EXPANSOR ROTATORIO

Actualmente el Instituto de Ingeniería cuenta con el expansor rotatorio diseñado y fabricado en la década del 2000. Los perfiles de los rotores de este expansor tienen una geometría similar a la mostrada en la figura 1.2. En la figura 2.1 se puede apreciar la geometría de los rotores y la disposición de éstos, los dos factores anteriores se combinan de tal manera que al girar los rotores se forma una cámara de volumen variable entre éstos. El diseño del expansor se describe a detalle en el artículo *Sealing system for a rotary expander*. (Chicurel, Sealing system for a rotary expander, 2010)



Figura 2.1 Disposición de los rotores

Los rotores están colocados en medio de dos placas circulares, éstas se llaman tapas laterales debido a que sirven como tapa a cada lado de la cámara de trabajo. Los rodamientos de las flechas para los rotores están montados en dichas tapas.

Cada rotor tiene dos sellos de cara y dos sellos de punta. Los sellos de cara se colocan en cada una de las caras planas de los rotores; éstos reducen las fugas debidas a los espacios entre los rotores y las tapas. Los sellos de punta se colocan en las puntas de los rotores; éstos reducen las fugas debidas a los espacios entre las puntas y los perfiles de los rotores. En la figura 2.2 se aprecia la disposición de los sellos (A en figura 2.2 sello de cara y B en figura 2.2 sello de punta).

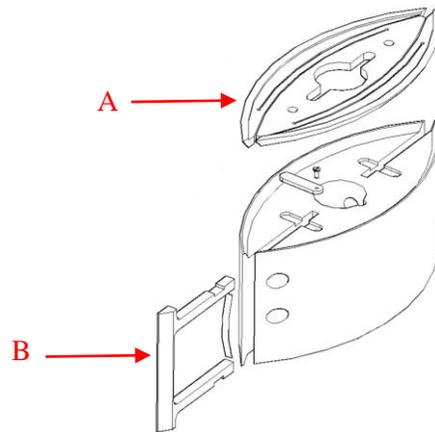


Figura 2.2 Diagrama explosivo de rotor y sellos (Chicurel, Sealing system for a rotary expander, 2010)

En una de las tapas está el sistema de admisión; ésta tiene al centro un barreno cónico que sirve como canal de entrada del gas hacia la cámara del expansor. La entrada del gas está controlada por una válvula recíprocante.

En la parte exterior de la otra tapa se encuentra el sistema de transmisión, que consiste de los engranes de sincronización y transmisión de potencia. Cada rotor tiene en su eje un engrane acunado; todos los engranes de los rotores se enlazan con un engrane central acunado a la flecha de salida de potencia. Las funciones de esta transmisión de engranes son: sincronizar los rotores para que todos giren en el mismo sentido y a la misma velocidad, y transmitir la potencia a la flecha de salida. La figura 2.3 muestra el sistema de transmisión del motor.



Figura 2.3 Sistema de transmisión

2.2 CICLO DE FUNCIONAMIENTO DEL EXPANSOR ROTATORIO

El ciclo de funcionamiento del expansor actual tiene tres etapas, que son: admisión, expansión y expulsión. En la figura 2.4 se ilustra el ciclo.

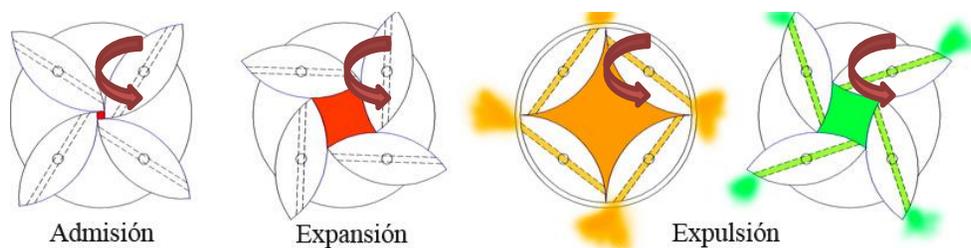


Figura 2.4 Ciclo de funcionamiento del expansor rotatorio (González, 2013)

El ciclo comienza con la etapa de admisión. En la posición inicial del ciclo, una punta de cada rotor se toca con una punta de los demás rotores; en esta posición el valor del volumen de la cámara del expansor es prácticamente cero. A esta posición se le denota como punto muerto superior (PMS) en analogía con un motor de émbolo. Después de aproximadamente 5° de giro de los rotores con respecto a la posición inicial, la válvula de admisión permite el paso del gas hacia la cámara. Después de poco más de 35° de giro de los rotores con respecto a la posición inicial, la válvula bloquea el paso del gas hacia el interior de la cámara.

A partir de este momento comienza la etapa de expansión. El gas que se encuentra en la cámara se expande transmitiendo su energía a los rotores. Un poco antes de que los rotores hayan girado 90° con respecto a la posición inicial se inicia la etapa de expulsión.

En la posición en la que las puntas de los rotores tocan la punta del rotor aledaño, el volumen de la cámara alcanza su valor máximo. A esta posición se le conoce como punto muerto inferior (PMI). La expulsión inicia cuando los canales de escape ingresan a la cámara.

Los canales de escape son dos barrenos paralelos maquinados a través de cada rotor. Éstos atraviesan el rotor de manera diagonal y permiten que el gas de la cámara sea descargado hacia el exterior.

Cuando los rotores llegan al punto muerto superior, todo el gas se ha descargado e inicia un nuevo ciclo. En cada ciclo los rotores giran 180° ; por lo tanto, por cada revolución del motor se tienen dos impulsos.

2.3 VARIANTES DE LOS SISTEMAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

2.3.1 Admisión Controlada con Válvula Rotatoria y Escape Axial

En las primeras versiones del motor rotatorio que se construyeron en el Instituto de Ingeniería, la admisión del fluido de trabajo estaba controlada por una válvula rotatoria. La válvula consistía de un apilamiento de discos que eran coaxiales con los rotores de admisión. Se alternaba a un disco acunado con el eje del rotor, con un disco fijo a la tapa lateral. Los discos móviles tenían un orificio que coincidía con el orificio en los rotores de admisión; por otra parte, los discos fijos tenían un orificio que coincidía con el orificio de admisión en la tapa lateral.

Para reducir las fugas, entre los discos se colocaron sellos laberínticos. Cuando coincidían los orificios de los discos móviles con los de los discos fijos, el fluido de trabajo podía ingresar a la cámara. El fluido pasaba de la válvula a la cámara a través de un canal en los rotores de admisión. Un par de rotores eran utilizados para la admisión mientras que el otro par era utilizado para el escape. La figura 2.5 muestra el esquema de la válvula de discos.

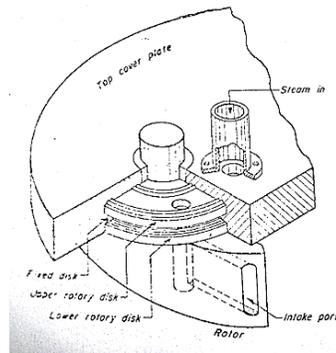


Figura 2.5 Válvula de discos (Chicurel, DEVELOPMENT OF A NOVEL ENGINE, 1979)

Los rotores de escape tenían un canal desde un extremo del rotor hasta su eje de rotación. Las flechas de los rotores de escape contaban con canales axiales concéntricos a ellas; cuando el canal en el rotor comunicaba con la cámara, el gas que se encontraba en ésta se dirigía a los canales de las flechas para después ser expulsado. La figura 2.6 muestra el flujo del gas a través de los rotores hacia los canales axiales.

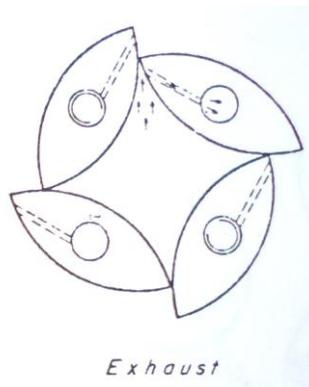


Figura 2.6 Escape axial (Chicurel, DEVELOPMENT OF A NOVEL ENGINE, 1979) (Chicurel, Rotary expander for operation with waste or solar derived heat, 2011)

2.3.2 Admisión Controlada por Válvula Reciprocante y Escape Radial a través de los Rotores

Como se mencionó anteriormente, en la versión actual del motor la admisión es controlada por una válvula reciprocante que es accionada por un mecanismo biela-manivela. La manivela está fija a la flecha de uno de los rotores y la biela conecta la manivela con el émbolo de la válvula. Una foto del mecanismo de la válvula se puede apreciar en la figura 2.7.

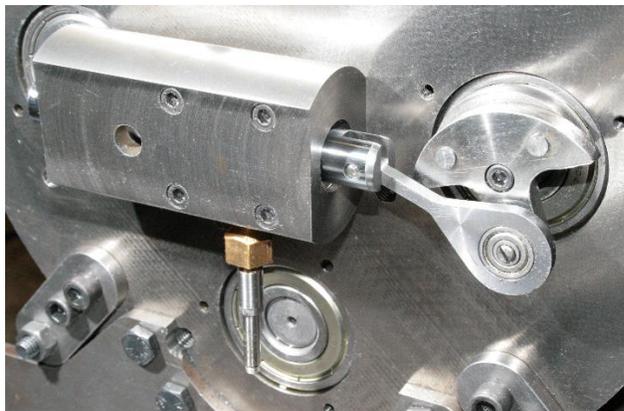


Figura 2.7 Válvula de admisión (Chicurel, Rotary expander for operation with waste or solar derived heat, 2011)

El émbolo es un tubo cerrado en ambos extremos; por lo tanto, se eliminan fuerzas resultantes debidas a la presión interior. Además, la válvula tiene puertos rectangulares que coinciden con los orificios de entrada y salida del cuerpo de la válvula dos veces por revolución. Con referencia a la figura 2.7 se aprecia el orificio de entrada en la parte frontal izquierda de la válvula. El orificio de salida que no está visible en esa figura, se encuentra en la parte posterior derecha de la válvula.

El cuerpo de la válvula tiene dos ranuras interiores anulares que coinciden con los orificios de admisión y escape; dichas ranuras tienen la función de equilibrar la presión radial en el émbolo.

El escape del fluido de trabajo en el motor es a través de canales que atraviesan los rotores y las flechas de los rotores de manera diagonal. Un poco antes de que el motor alcance el PMI, los canales ingresan a la cámara y el gas sale de a través de ellos. Ver figura 2.8.



Figura 2.8 Canales de escape

3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE INYECCIÓN DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO



3.1 DISEÑO CONCEPTUAL DEL BANCO DE PRUEBAS

Para realizar las pruebas de inyección de peróxido de hidrógeno se requiere un sistema en el cual se puedan controlar y medir los parámetros de inyección, conocer las condiciones de presión y temperatura dentro de la cámara, y registrar las mediciones para su posterior análisis. Además, la seguridad es un factor muy importante debido a que el peróxido de hidrógeno de alta concentración es muy peligroso para los ojos y puede causar quemaduras en la piel.

El sistema se dividió en tres subsistemas, que son: inyección, instrumentación y adquisición de datos.

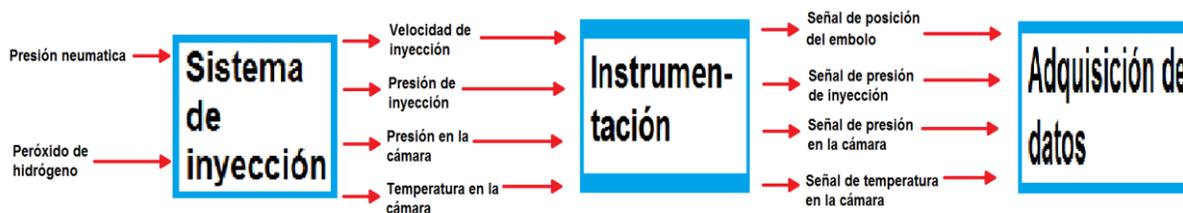


Figura 3.12 Elementos del sistema para pruebas de inyección

3.2 MODIFICACIONES DE ELEMENTOS PREVIOS PARA INTEGRACIÓN AL BANCO DE PRUEBAS.

3.2.1 Inyector para el Motor Rotatorio y Modificaciones

Durante el trabajo previo en el proyecto del expansor rotatorio se diseñó y se fabricó un inyector de peróxido de hidrógeno, al cual se le realizaron algunas modificaciones para intergrarlo al banco de pruebas. El diseño de éste es tal que permite el flujo del líquido en una sola dirección. El inyector fue diseñado por Naranjo Javier como una aportación al proyecto. El inyector consta de las partes mostradas en las figuras 3.1 a 3.5, que son: cuerpo, vástago, resorte, tuerca y tapa.

El cuerpo del inyector soporta a los demás componentes; en su base tiene cuatro barrenos a través de los cuales se colocan los tornillos para fijarlo en la tapa superior de la cámara. En la parte superior tiene seis barrenos roscados para fijar la tapa. Las modificaciones realizadas consistieron de maquinarse un barreno pasado en la base, a través del cual pasa el cable del termopar. En la figura 3.1 se aprecia el cuerpo del inyector.



Figura 3.1 Cuerpo del inyector

El vástago, que se muestra en la figura 3.2, tiene una cabeza cónica que asienta en el cuerpo del inyector y sella el orificio de salida; en el otro extremo está roscado.



Figura 3.2 Vástago del inyector

El resorte se coloca en el interior del inyector y queda confinado entre el cuerpo del inyector y la tuerca. El resorte se aprecia en la figura 3.3.



Figura 3.3 Resorte del inyector

La tuerca se acopla al extremo roscado del vástago y al girarla en sentido dextrógiro desciende y comprime al resorte; cuanto más comprimido esté, se necesitará mayor presión para que el fluido desplaze el vástago y pueda salir del inyector.



Figura 3.4 Tuerca del inyector

La tapa del inyector tiene un barreno roscado concéntrico; en esta cuerda se acopla el cilindro de inyección. Además tiene seis barrenos a través de los cuales pasan los tornillos con los que se fija la tapa al cuerpo del inyector. La tapa original, que se aprecia en la figura 3.5(a), tenía muy poca área superficial en la parte superior; por lo que se diseñó y se fabricó una tapa con mayor área superficial; lo cual permite colocar un arosello en la junta cilindro-inyector y evitar fugas de fluido. La tapa rediseñada se aprecia en la figura 3.5(b).



Figura 3.5 Tapa original y tapa rediseñada

Con la finalidad de evitar que el peróxido de hidrógeno se derrame por la junta tapa-cuerpo de inyector, se fabricó un empaque de neopreno que se coloca en dicha junta. Todos los componentes del inyector son de acero inoxidable debido a que con este material el peróxido de hidrógeno no reacciona. La figura 3.7 muestra todos los elementos del inyector.



Figura 3.7 Elementos del inyector

3.2.2 Modificaciones al Cámara Catalítica de González Alejandro

Se retomó la cámara fabricada por el González Alejandro (González, 2013), y se realizaron modificaciones en algunos componentes.

En la tapa superior se modificó el barreno que es concéntrico a ésta; a tal barreno se le hizo conicidad con un ángulo igual al que tiene la salida del inyector. Se maquinó un canal para colocar un arosello y de esta manera evitar fugas en la junta tapa superior-inyector. Se maquinaron cuatro barrenos roscados para fijar el inyector. En la cara interior de la tapa se maquinó un canal para colocar un arosello. En la figura 3.8 a) se pueden apreciar la cara superior de la tapa y en la figura 3.8 b) se puede apreciar la cara inferior.



a)

b)

Figura 3.8 Tapa superior de la cámara

El recipiente para el catalizador es un vaso de latón que tiene barrenos en el fondo para facilitar el paso de los productos de la reacción hacia la parte inferior de la cámara; en uno de ellos se colocó un esparrago de acero inoxidable que sirve como soporte al catalizador y permite variar la altura a la cual se coloca éste. El anillo de aluminio de la parte superior se maquinó para dejar una superficie plana. El recipiente para el catalizador se muestra en la figura 3.9. Tanto en el interior del recipiente para el catalizador como en el de la cámara catalítica se colocaron canicas para reducir el volumen, con lo cual el volumen final al interior de la cámara catalítica es 98 cm^3 .



Figura 3.9 Recipiente para el catalizador

En la tapa inferior se colocó un cople que permite sujetar el sensor de presión dinámica. Al final del canal de escape, se colocó una válvula de alivio calibrada a 500 psi, un manómetro y una válvula de compuerta, elementos que se pueden apreciar en la figura 3.11. Además se maquinó un canal para colocar un arosello y evitar fugas en la junta cámara-tapa inferior. En la figura 3.10 se puede apreciar la cara interior de la tapa inferior.



Figura 3.10 Tapa inferior de la cámara



Figura 3.11 Elementos en la tapa inferior

3.3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL SISTEMA DE INYECCIÓN

El sistema de inyección requiere que el volumen de fluido que se inyectará pueda ser controlado. Es importante evitar que el peróxido de hidrógeno esté confinado antes de ser inyectado, ya que podría comenzar a descomponerse provocando la presurización del contenedor. Los materiales del mecanismo que se utiliza para inyectar el peróxido de hidrógeno no deben acelerar la descomposición de éste, por lo tanto se utilizó acero inoxidable.

Para aplicar presión al peróxido de hidrógeno se diseñó un cilindro que es accionado por aire comprimido. El aire comprimido es controlado por un regulador y una válvula solenoide, una foto de éste se presenta en la imagen 3.14. En la imagen 3.13 se muestra el circuito neumático que regula el paso del aire hacia el cilindro.

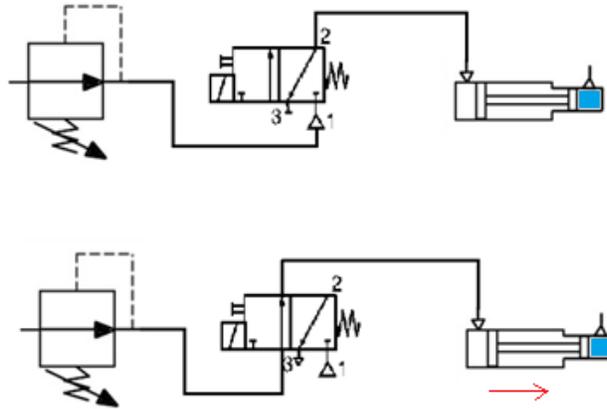


Figura 3.13 Circuito neumático para inyección de peróxido.

En el circuito se utiliza un regulador de presión (figura 3.14) con un rango de 0 a 100 psi. Después de éste, hay una válvula solenoide 3/2; ésta es controlada con una computadora. La válvula solenoide utilizada puede ser apreciada en la figura 3.15.



Figura 3.14 Regulador de presión



Figura 3.15 Válvula solenoide

El cilindro de inyección tiene un émbolo de doble diámetro, una fotografía de éste se puede apreciar en la figura 3.16. La parte del émbolo con diámetro mayor recibe la presión del aire comprimido, mientras que el diámetro menor ejerce presión sobre el peróxido de hidrógeno; la relación de diámetros es 3:1. El émbolo tiene arosellos para evitar el paso de aire comprimido hacia la parte en donde se encuentra el peróxido de hidrógeno y viceversa. Tanto el cilindro como el émbolo están hechos de acero inoxidable.



Figura 3.16 Émbolo y arosellos.

Al émbolo se le fijó una varilla por medio de rosca; ésta sale por la tapa superior y se utiliza para montar el indicador de posición del émbolo.

La tapa del cilindro se fija a él con seis tornillos, dichos elementos se presentan en la figura 3.17. Entre la tapa y el cilindro se coloca un arosello.

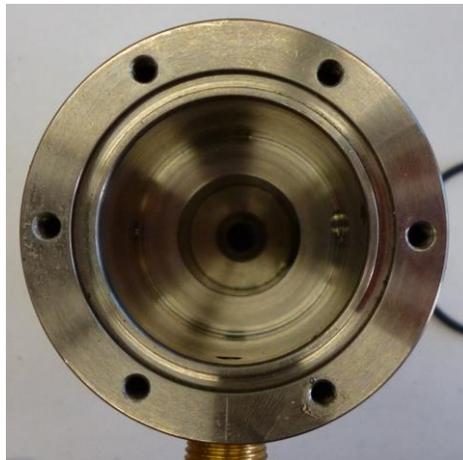


Figura 3.17 Tapa del cilindro y tornillos de fijación

En el cuerpo del cilindro se maquinaron las conexiones y salidas necesarias. Para la alimentación del aire comprimido se hizo un barreno con rosca NPT en la parte superior del cilindro. Se maquinaron cuatro barrenos en la periferia que permiten el escape del aire cuando el émbolo desciende. En la parte inferior se maquinó, por un lado del cilindro, una cavidad para colocar un sensor de presión. Para colocar las válvulas de purga se maquinaron dos barrenos con cuerda para rosca de 1/8 de pulgada NPT. El cilindro lleva en la parte inferior una conexión con rosca de 7/16 de pulgada; ésta sirve para acoplar el cilindro con el inyector. El peróxido de hidrógeno sale del cilindro por un canal que es concéntrico a la conexión. La figura 3.18 (a) muestra una vista exterior del cuerpo del cilindro, mientras que la figura 3.18 (b) muestra una vista interior.



(a)



(b)

Figura 3.18 Cuerpo del cilindro de inyección

3.4 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

Las variables físicas que se midieron son las siguientes: posición del émbolo, presión a la que es inyectado el peróxido de hidrógeno, temperatura dentro de la cámara, presión dentro de la cámara.

Los sensores para realizar estas mediciones fueron seleccionados y adquiridos con base en el rango de medición requerido.

3.4.1 Sensores

Para medir la posición del émbolo se seleccionó un potenciómetro resistivo lineal. El sensor seleccionado es el modelo SoftPot de la marca *Spectra Symbol* que tiene la ventaja de ser pequeño, su sección transversal es de tan sólo 0.51 mm. Para colocarlo, se fabricó un soporte a partir de un ángulo de aluminio a 90 grados. En una de sus caras se maquinaron tres ranuras que están alineadas con los tornillos de la tapa del cilindro y permiten que el soporte pueda moverse con respecto de la varilla del émbolo y a su vez quede sujetado con los tornillos de la tapa del cilindro. El indicador que se utiliza es el cartucho de un bolígrafo, el cual va montado en un soporte que se fija a la varilla. La figura 3.19 muestra el sensor de posición y el indicador.

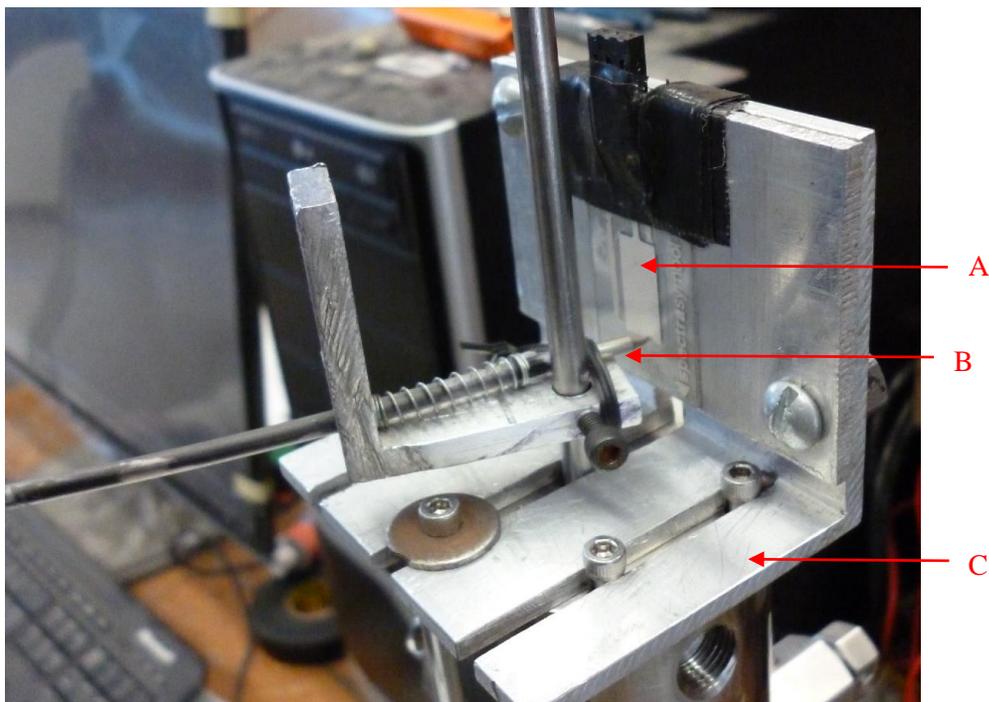


Figura 3.19 Sensor de posición (A), indicador (B) y soporte(C)

Para medir la presión del peróxido de hidrógeno cuando es inyectado, se seleccionó un sensor de presión que incorpora un puente de Wheatstone. Para mantener al sensor en su lugar, se utiliza una lámina que está sujeta al cilindro con dos tornillos, uno a cada lado, en la figura 3.20 se aprecia el sensor de presión colocado en el cilindro. Dicho sensor tiene un rango de medición de 0 a 500 psi.



Figura 3.20 Sensor de presión del peróxido sujetado al cilindro

Para medir la temperatura dentro de la cámara, se seleccionó un termopar tipo J. Este sensor tiene un rango de medición de 0 a 500 °C. En la figura 3.21 se aprecia la cavidad donde está alojado el termopar.

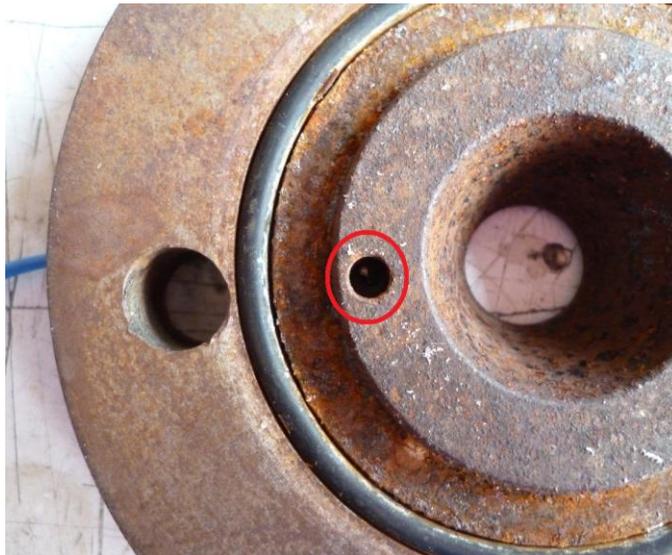


Figura 3.21 Sensor de temperatura del interior de la cámara

El sensor para medir la presión dentro de la cámara es de tipo piezoeléctrico de la marca PCB. Éste tiene un rango de 0 a 100 psi. La temperatura de operación del sensor es de 0 a 500 °C. El sensor cuenta con un acondicionador de señal de la misma marca. La figura 3.22 (a) muestra el sensor de presión y la figura 3.22 (b) muestra el acondicionador de señal.



(a)

(b)

Figura 3.22 Sensor de presión de la cámara y acondicionador de señal.

Para ingresar las señales de la salida de los sensores de temperatura, posición y presión a la tarjeta de adquisición de datos; se diseñaron y construyeron los acondicionadores de señal para cada uno de ellos.

3.4.2 Acondicionador de Señal para el Sensor de Temperatura

El acondicionador para la señal del sensor de temperatura se fabricó con un amplificador de instrumentación modelo AD620, con una ganancia de 200, utilizando una resistencia de 249Ω ; para su ajuste de cero, se colocó un potenciómetro de precisión de $5 \text{ k}\Omega$ en su referencia. En la hoja de datos se recomienda, cuando se utiliza un termopar, colocar un regreso a tierra para la corriente de polarización de entrada, lo cual se hizo. Se colocaron capacitores en las entradas del amplificador y en las líneas de polarización para atenuar las señales de alta frecuencia. El circuito implementado se muestra en la figura 3.23.

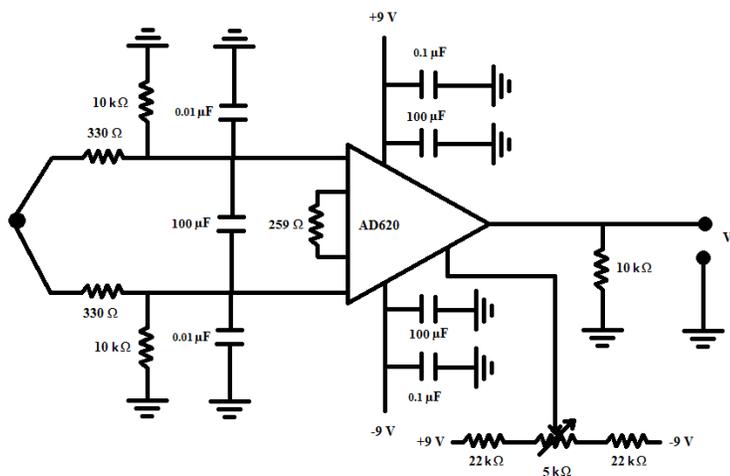


Figura 3.23 Acondicionador de señal para el termopar

3.4.3 Acondicionador de Señal para el Sensor de Presión de Inyección

Los componentes del acondicionador de señal para el sensor de presión de inyección de peróxido de hidrógeno son: batería de alimentación, regulador de voltaje y amplificador. La batería de alimentación es una batería recargable de 9 V con capacidad de 170 mAh; el regulador de voltaje es un circuito integrado modelo 7805 al que se le colocaron capacitores en la entrada y la salida para reducir los picos de voltaje. El amplificador es un circuito integrado modelo AD620, con una ganancia de 50, utilizando una resistencia de 1 k Ω ; para su ajuste de cero, se colocó un potenciómetro de precisión de 5 k Ω en su referencia. Se colocaron capacitores en las entradas del amplificador y en las líneas de polarización para atenuar las señales de alta frecuencia. El circuito se muestra en la figura 3.24.

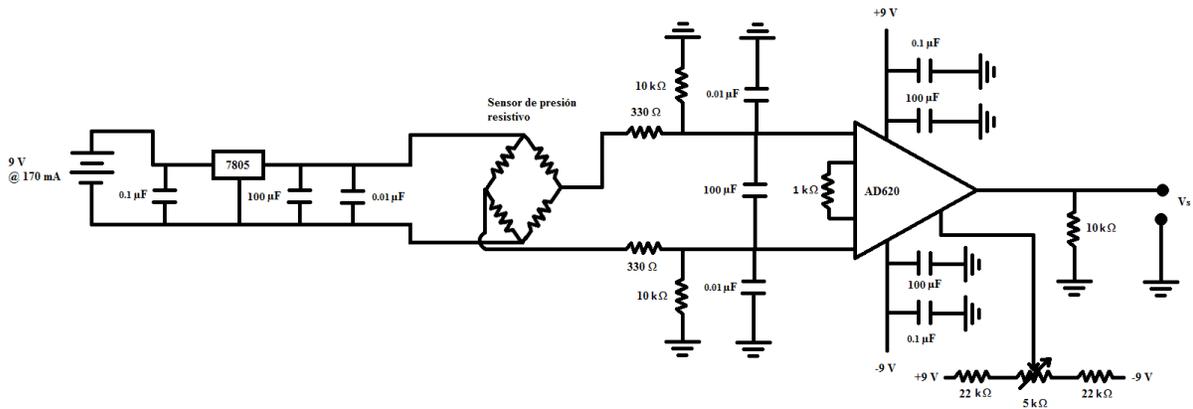


Figura 3.24 Acondicionador de señal para la el sensor de presión resistivo

3.4.4 Acondicionador de Señal para el Sensor de Posición

Los componentes del acondicionador de señal para el potenciómetro resistivo lineal son: batería de alimentación, regulador de voltaje y seguidor de voltaje. La batería de alimentación es una batería recargable de 9 V de 170 mAh. El regulador de voltaje es un circuito integrado modelo 7805, al que se le colocaron capacitores en la entrada y la salida para reducir los picos de voltaje. El seguidor de voltaje se fabricó con un circuito modelo LM741. En la figura 3.25 se aprecia el diagrama del circuito acondicionador.

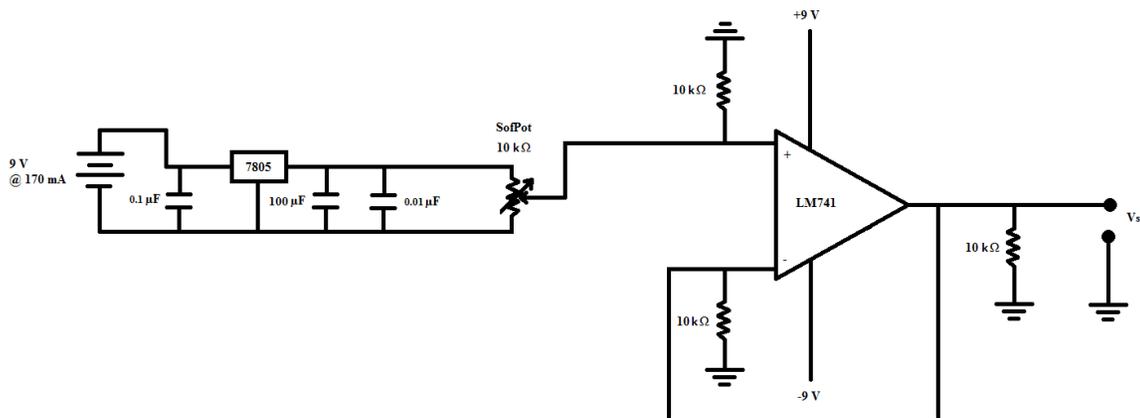


Figura 3.25 Seguidor de voltaje para sensor de posición

Los amplificadores de instrumentación y el seguidor de voltaje se polarizaron con +9 V y -9 V, que se obtienen de un arreglo de dos baterías de 12 V con una capacidad de 4 Ah cada una, conectadas a los reguladores 7809 y 7909. La fuente de voltaje se muestra en la figura 3.26.

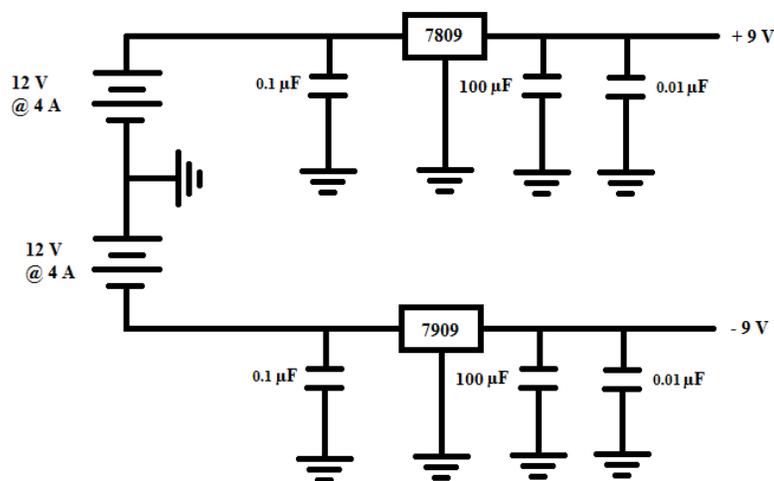


Figura 3.26 Fuente de voltaje para polarizar amplificadores

3.4.5 Circuito de Control de la Válvula Solenoide

Se implementó un circuito para controlar la válvula solenoide que consiste de los siguientes elementos: optoacoplador, transistor y relevador. El circuito es activado con un pulso digital que se genera con la tarjeta de adquisición de datos y se controla con el software LabVIEW. Cuando el pulso digital está en nivel bajo, la bobina del relevador está energizada y viceversa. En la terminal común del relevador se conectan 127 V de corriente alterna y en el conector normalmente cerrado se conecta una de las terminales de la válvula solenoide. Cuando se desenergiza el relevador, la válvula solenoide se activa y el aire comprimido empuja al émbolo.

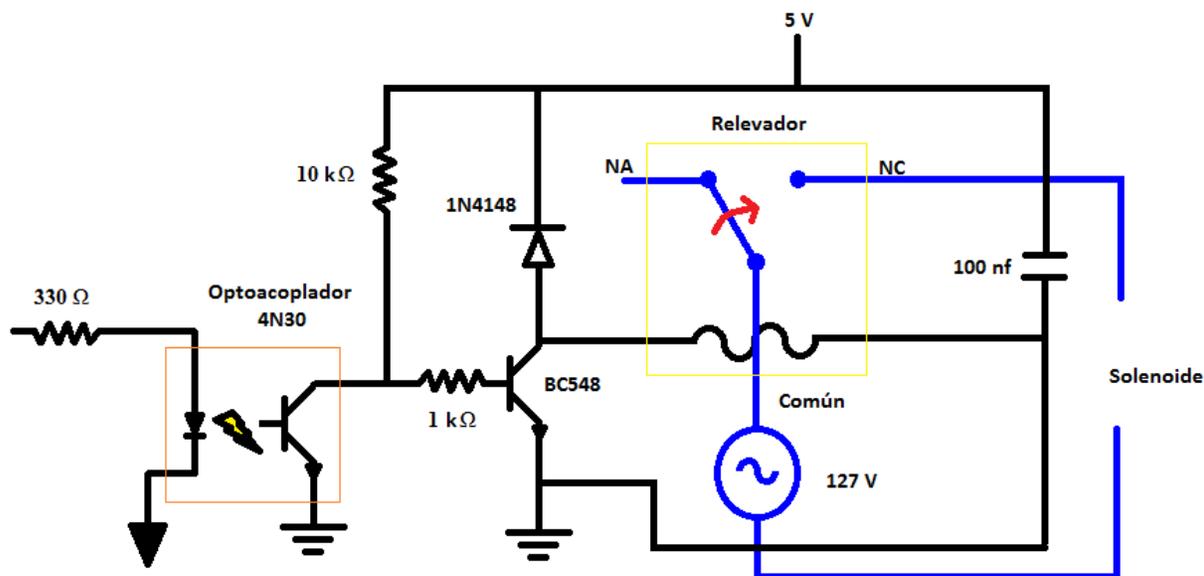


Figura 3.27 Circuito de control para la válvula solenoide

Todos los circuitos fueron montados en dos placas de prueba que se colocaron dentro de un recipiente de plástico. En las paredes del recipiente se montaron conectores para la alimentación de los circuitos, y para las entradas y salidas de las señales. Para la alimentación de los circuitos se colocaron conectores del tipo banana hembra. Para la entrada y salida de las señales de los sensores se colocaron conectores tipo BNC hembra; las figura 3.28 a 3.31 muestran los conectores colocados y en la figura 3.27 se pueden apreciar los circuitos.

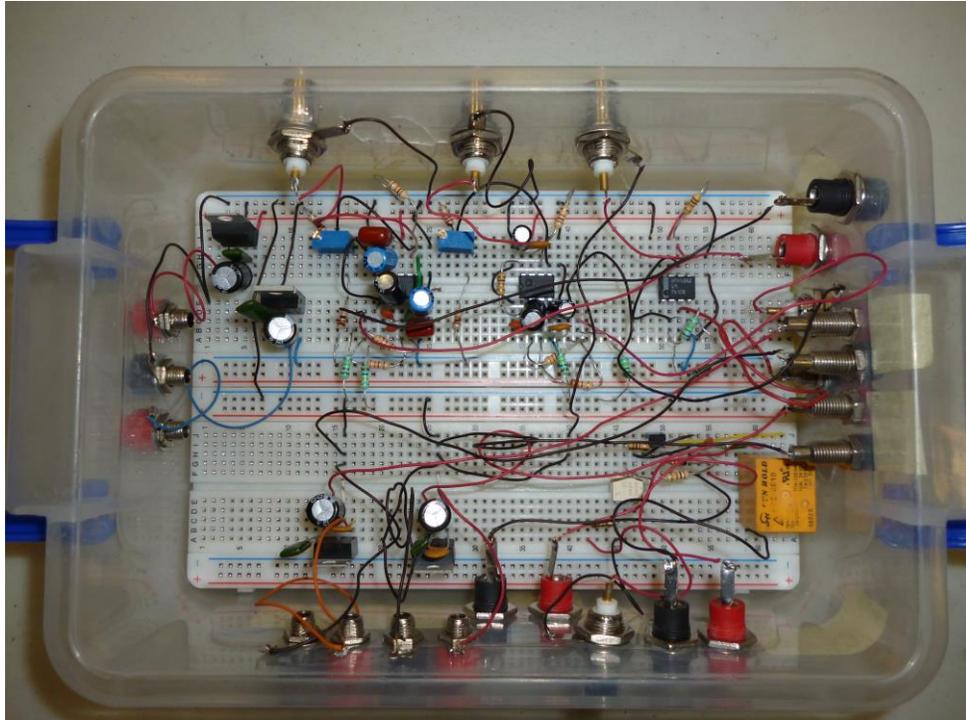


Figura 3.27 Recipiente con circuitos

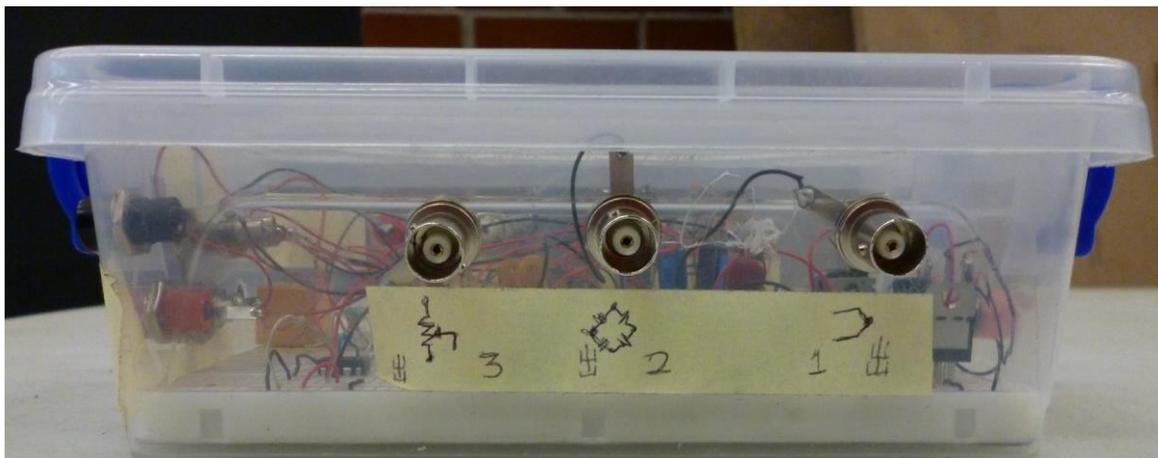


Figura 3.28 Salidas de los acondicionadores

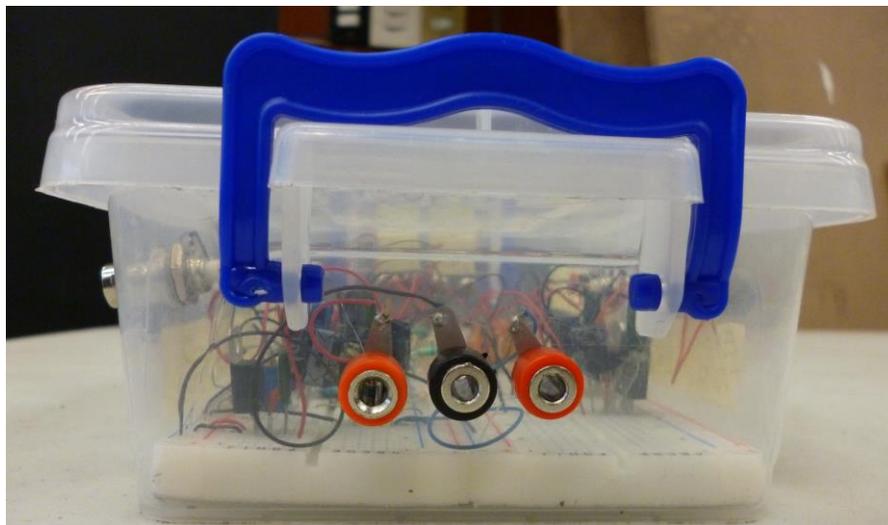


Figura 3.29 Conectores para polarización de los acondicionadores



Figura 3.30 Conectores para alimentar los reguladores de voltaje y el control de la válvula

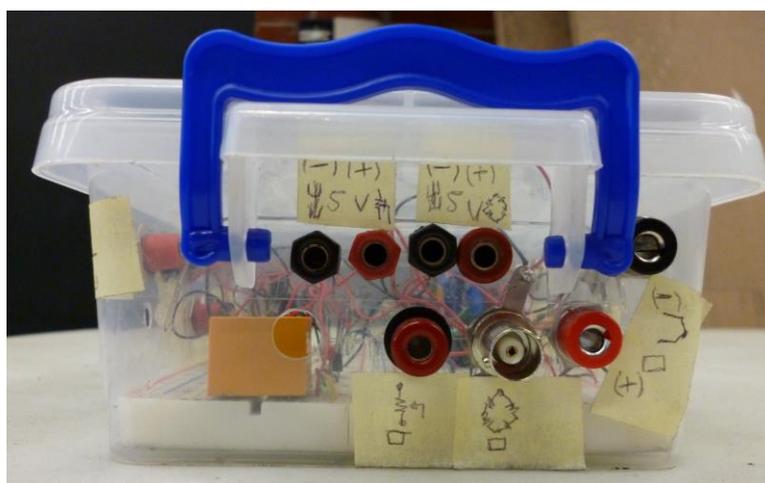


Figura 3.31 Conectores para alimentación de sensores y conectores de entrada a los acondicionadores

3.2.5 Diseño y Elaboración del Sistema de Adquisición de Datos

Para el registro de las señales eléctricas de los sensores y su posterior análisis, se diseñó y se elaboró el sistema de adquisición de datos.

Las señales eléctricas de la salida de los sensores pasan a los acondicionadores de señal y posteriormente se ingresan a la computadora utilizando una tarjeta de adquisición de datos PCI modelo NI-PCI-MIO-16E-4 de la marca *National Instruments*.

Para poder hacer la conversión del valor de las señales eléctricas a los valores de las variables físicas medidas fue necesario calibrar los sensores.

El sensor de temperatura se calibró variando la temperatura de un recipiente con agua y voltaje de la instrumentación fue medido con la tarjeta de adquisición de datos y el software *MAX* de *National Instruments*. La temperatura del agua fue medida con un termómetro de mercurio. Se tomaron lecturas cada 5 °C desde 0 hasta 90 °C, tanto aumentando como disminuyendo de la temperatura. Se obtuvo un promedio de ambas lecturas y se graficó en el software *Excel*. La gráfica fue aproximada a una línea recta y se calculó su pendiente utilizando el mismo software. En la figura 3.32 se aprecia la gráfica de calibración del termopar.

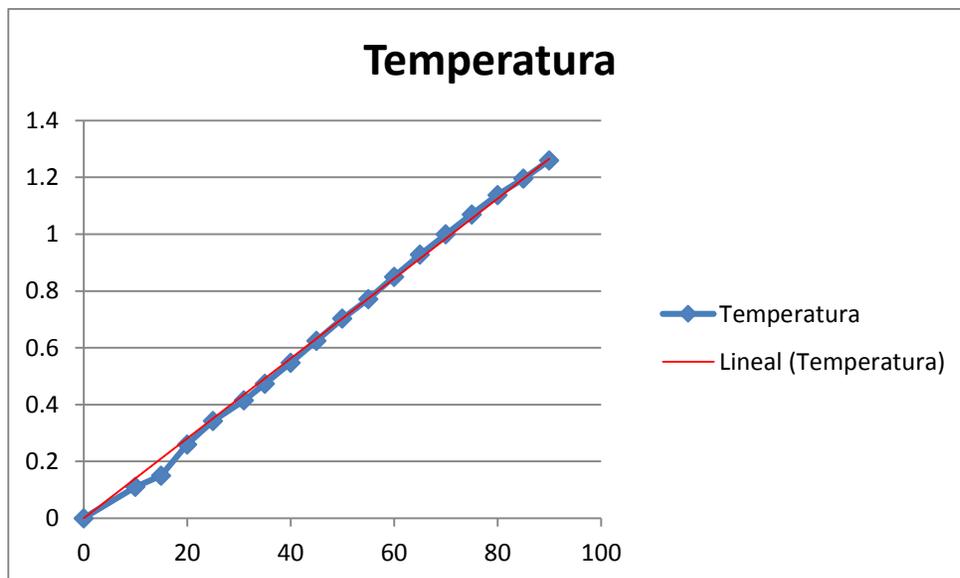


Figura 3.32 Calibración del termopar

El potenciómetro lineal se calibró utilizando un indicador montado en un vernier digital y el voltaje de la instrumentación fue medido con la tarjeta de adquisición de datos y el software *MAX* de *National Instruments*. La lectura del desplazamiento se tomó de la carátula del vernier cada milímetro, tanto en avance como en retroceso. Se obtuvo un promedio de ambas lecturas y se graficó en el software *Excel*. La gráfica fue aproximada a una línea recta y se calculó su pendiente utilizando el mismo software. En la figura 3.33 se aprecia la gráfica de calibración de potenciómetro lineal.

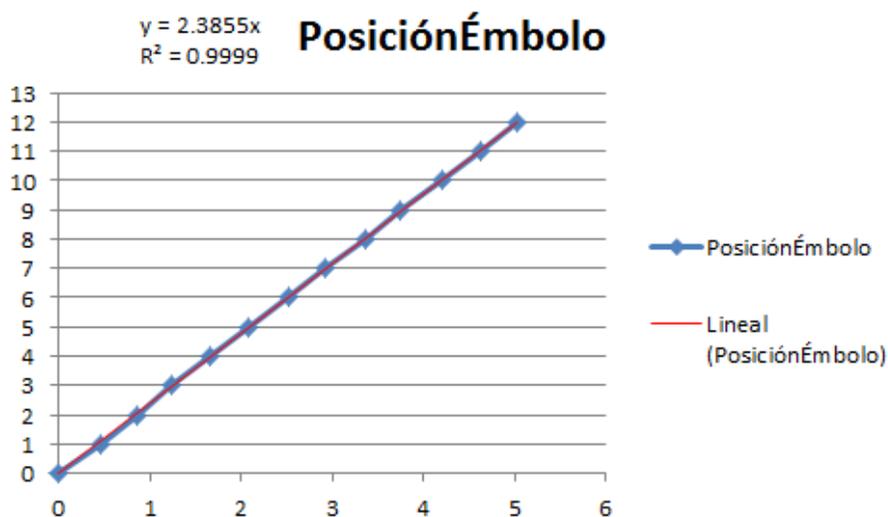


Figura 3.33 Calibración del sensor de posición

El sensor de presión se calibró utilizando una balanza de pesos muertos. El voltaje de la instrumentación fue medido con la tarjeta de adquisición de datos y el software *MAX* de *National Instruments*. La lectura de la presión se tomó de las pesas que se colocaban en la balanza. Se tomaron lecturas cada 20 psi desde 0 hasta 500 psi tanto en incremento como en decremento de la presión. Se obtuvo un promedio de ambas lecturas y se graficó en el software *Excel*. La gráfica fue aproximada a una línea recta y se calculó su pendiente utilizando el mismo software. En la figura 3.32 se aprecia la gráfica de calibración del sensor de presión.

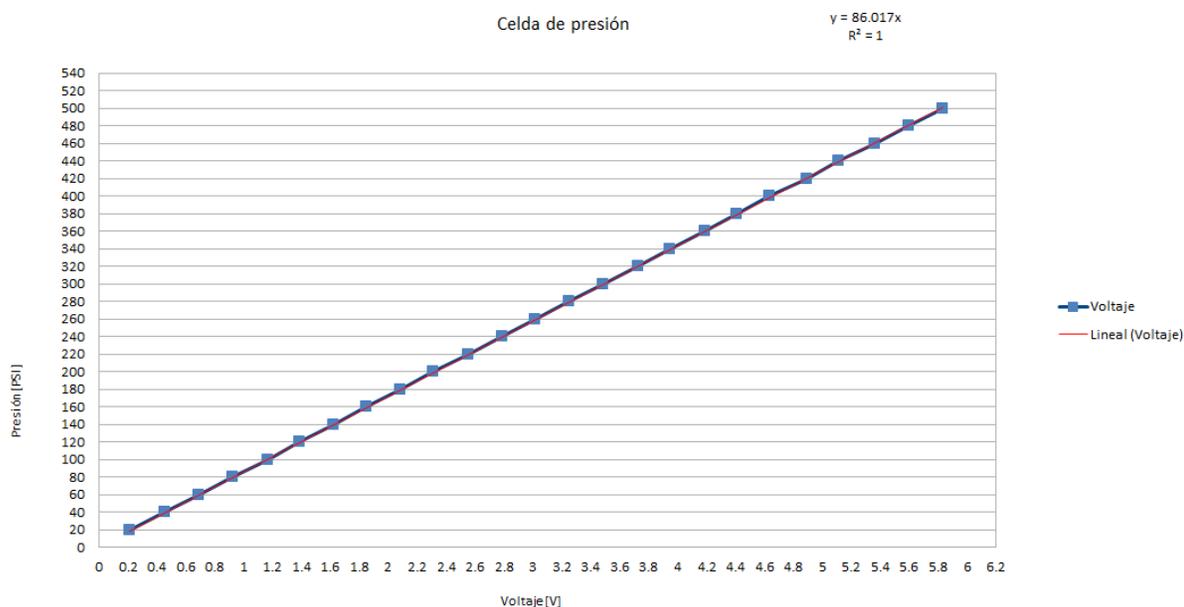


Figura 3.34 Calibración del sensor de presión resistivo

El programa de lectura, procesamiento y almacenamiento de las señales analógicas fue elaborado en el software *LabVIEW*.

El programa tiene dos partes principales, el panel frontal y el diagrama de bloques. En el panel frontal se encuentran los elementos que permiten visualizar de manera dinámica la variación de las mediciones de los sensores, el botón de control para la válvula solenoide y el botón para activar o desactivar el almacenamiento de los datos.

El valor de la presión dentro de la cámara se muestra en un gráfico del tipo *Waveform Chart* que en el eje vertical muestra el valor de la presión y en el eje horizontal el número de muestras. Las escalas de los ejes se ajustan automáticamente.

El valor de la presión de inyección se muestra en un gráfico del tipo *Waveform Chart* que en el eje vertical muestra el valor de la presión, la escala de este eje está fija entre 0 y 200 psi. El eje horizontal muestra el número de muestras; la escala de éste se ajusta automáticamente.

El valor de la temperatura se muestra en un indicador deslizante cuya escala va de 0 a 300 °C.

La posición del émbolo se muestra en un indicador deslizante cuya escala va de 0 a 12 mm.

El botón que controla el pulso digital para activar la válvula solenoide se muestra con la etiqueta “Control de la válvula solenoide” y el botón que controla el almacenamiento de datos se muestra con la etiqueta “Control de DAQ”. En la figura 3.35 se puede apreciar el panel frontal del programa de adquisición de datos.

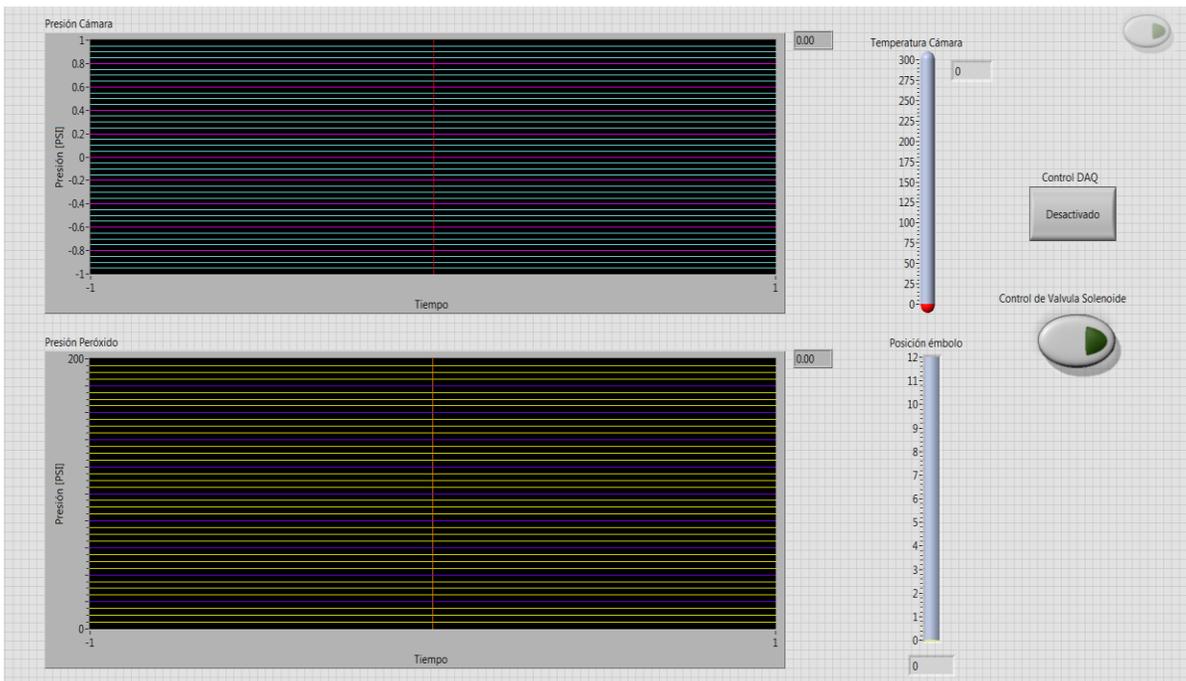


Figura 3.35 Panel frontal del programa de procesamiento de señales

En el diagrama de bloques se encuentra el código del programa en el que todas las funciones e instrumentos están dentro de un ciclo *while* que se ejecuta mientras el programa esté activo. Para leer las señales que ingresan a la tarjeta de adquisición de datos se utilizó el instrumento virtual *DAQ Assistant Express*, dentro del cual se configuraron cuatro canales analógicos de voltaje.

Los canales se asignaron de la siguiente manera: canal cero para la presión de la cámara, canal uno para la temperatura dentro de la cámara, canal dos para la presión de inyección y canal tres para la posición del émbolo. Se configuró el instrumento virtual para tomar muestras de cada canal con una frecuencia de 200 Hz. Cada muestra se multiplica por la pendiente obtenida en la calibración, de esta manera se convierte a las unidades de la variable física medida; después de las operaciones los datos se envían a su respectivo indicador del panel frontal y al instrumento virtual *Write to Measurement File* para almacenar los datos en un archivo de texto.

En el archivo de texto se coloca al inicio un encabezado que muestra la configuración del instrumento virtual y los datos se colocan en una columna por cada canal; además, se agrega una columna en la cual se muestra la hora en que se inicia el ciclo de muestreo.

Para generar el pulso digital que controla la válvula solenoide se utilizó el instrumento virtual *DAQ Assistant Express* el cual fue configurado con una línea de salida digital. En el panel frontal se colocó un botón para controlar el pulso digital, cuando se hace clic sobre éste, el valor de la salida digital cambia. En la figura 3.36 se puede apreciar el diagrama de bloques del programa para adquisición de datos.

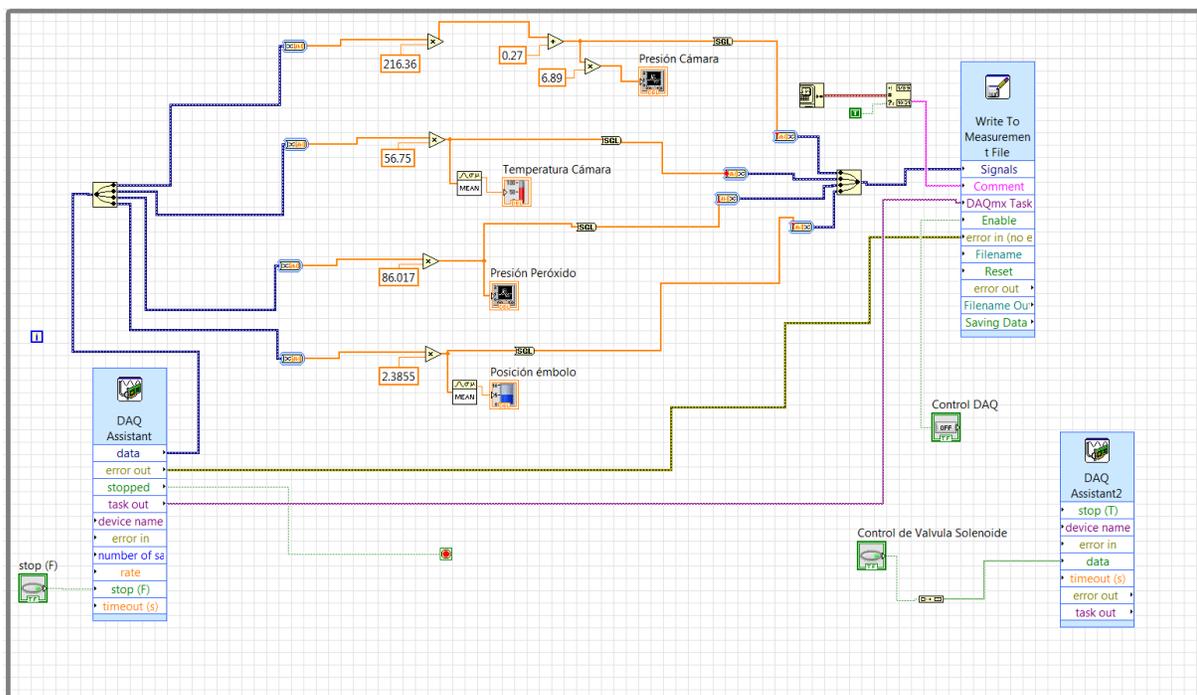


Figura 3.36 Diagrama de bloques del programa para procesamiento de señales

4 PRUEBAS DE INYECCIÓN



4.1 METODOLOGÍA DE LAS PRUEBAS

Para realizar las pruebas de inyección de peróxido de hidrógeno con la cámara a temperatura ambiente se procedió de la siguiente manera:

1. Se ensamblaron todos los componentes del sistema de inyección.
2. Se conectaron los sensores y los acondicionadores.
3. Se inició el programa de captura de datos.
4. Se verificó que los sensores trabajaran correctamente.
5. Se colocó el equipo de seguridad.
6. Se purgó el cilindro y el inyector, y se cargó el cilindro con peróxido de hidrógeno.
7. Se cerró la válvula de salida de la cámara.
8. Se activó el almacenamiento de las lecturas de los sensores
9. Se activó la válvula solenoide.
10. Se desactivó el almacenamiento de las lecturas de los sensores.
11. Se descargarón los productos de la cámara catalítica.

Se presentaron dificultades para purgar el sistema de inyección cuando éste estaba por encima de la temperatura ambiente, ya que cuando se introducía el peróxido de hidrógeno en el cilindro caliente éste comenzaba a descomponerse rápidamente. Debido a tal situación, se procedió de la siguiente manera: se retiró la tapa superior de la cámara junto con el inyector y el cilindro. La cámara catalítica se calentó a la temperatura deseada. Posteriormente se fijó la tapa superior a la cámara, con lo cual se retardó el calentamiento del inyector y del cilindro permitiendo purgar el cilindro.

En todas las pruebas se utilizó como catalizador una pila de 9 rejillas de alambre recubierto de plata. Cada rejilla tiene un diámetro de 38.3 mm y un espesor de 0.7 mm. La figura 4.1 muestra una de las rejillas utilizadas.

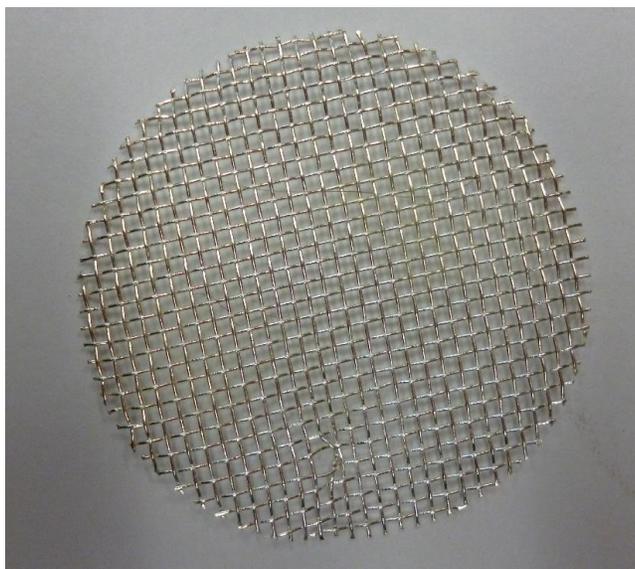


Figura 4.1 Catalizador

4.2 PRUEBAS CON LA CÁMARA A TEMPERATURA AMBIENTE

Se realizaron pruebas con la cámara a temperatura ambiente para conocer el comportamiento de la reacción bajo estas condiciones de temperatura.

Utilizando el software *Excel* se graficaron las lecturas de los sensores con respecto al tiempo.

A continuación se muestran los resultados de las pruebas

Prueba 1

Volumen de peróxido inyectado: 2.8 cm³

Presión del aire comprimido: 60 psi

Volumen de la cámara catalítica: 98 cm³

Variable	Valor inicial/ Tiempo [s]	Valor máximo/ Tiempo [s]	Incremento
Cambio de Presión en la Cámara [psi]	1936.7*/0	1980/2.000	43.3
Temperatura en la Cámara [°C]	23/0	101/3.490	78
Presión de Inyección [psi]	5.4/0	30.2/0.310	24.8
Posición del émbolo [mm]	10/0	0/0.025	-10

*Este valor corresponde a cero manométrico en esta prueba.

El tiempo que tarda la presión en alcanzar el valor máximo bajo las condiciones de esta prueba, no produciría una velocidad de rotación práctica en el expansor.

Prueba 2

Volumen de peróxido inyectado: 3.1 cm³

Presión del aire comprimido: 60 psi

Volumen de la cámara catalítica: 98 cm³

Variable	Valor inicial/ Tiempo [s]	Valor máximo/ Tiempo [s]	Incremento
Cambio de Presión en la cámara [psi]	1782.5*/0	1807.3/1.480	24.8
Temperatura en la cámara [°C]	29.4/0	197.5/1.295	168.1
Presión de inyección [psi]	4.2/0	27.3/0.220	23.1
Posición del émbolo [mm]	10.1/0	0/0.220	-10.1

*Este valor corresponde a cero manométrico en esta prueba.

El tiempo que tarda la presión en alcanzar el valor máximo bajo las condiciones de esta prueba, no produciría una velocidad de rotación práctica en el expansor.

En esta prueba la temperatura de la cámara estaba por encima de la temperatura ambiente ya que previamente se había realizado una prueba.

4.3 PRUEBAS CON LA CÁMARA CALIENTE

Se realizaron pruebas con la cámara caliente para conocer el comportamiento de la reacción bajo estas condiciones. Para precalentar la cámara se utilizó una resistencia tipo banda de 850 W.

Utilizando el software Excel se graficaron las lecturas de los sensores con respecto al tiempo.

A continuación se muestran los resultados de las pruebas.

Prueba 1

Volumen de peróxido inyectado: 2.74 cm³

Presión del aire comprimido: 100 psi

Volumen de la cámara catalítica: 98 cm³

Variable	Valor inicial/ Tiempo [s]	Valor máximo/ Tiempo [s]	Incremento
Cambio de Presión en la cámara [psi]	1917.19*/0	1996.42/1.085	79.23
Temperatura en la cámara [°C]	97.72/0	282.42/0.395	184.7
Presión de inyección [psi]	11.76/0	39.06/0.37	27.3
Posición del émbolo [mm]	11.26/0	0.49/0.015	-10.77

*Este valor corresponde a cero manométrico en esta prueba.

El tiempo que tarda la presión en alcanzar el valor máximo bajo las condiciones de esta prueba, no produciría una velocidad de rotación práctica en el expansor, sin embargo se observa un incremento en la presión dentro de la cámara con respecto a las pruebas con la cámara a temperatura ambiente.

Prueba 2

Volumen de peróxido inyectado: 2.6 cm³

Presión del aire comprimido: 100 psi

Volumen de la cámara catalítica: 98 cm³

Variable	Valor inicial/ Tiempo [s]	Valor máximo/ Tiempo [s]	Incremento
Cambio de Presión en la cámara [psi]	1853.27*/0	1927.22/1.44	73.95
Temperatura en la cámara [°C]	98/0	342.5/0.475	244.5
Presión de inyección [psi]	9.2/0	31/0.33	21.8
Posición del émbolo [mm]	12/0	0.7/0.035	11.3

*Este valor corresponde a cero manométrico en esta prueba.

El tiempo que tarda la presión en alcanzar el valor máximo bajo las condiciones de esta prueba, no produciría una velocidad de rotación práctica en el expansor, sin embargo se observa un incremento en la presión dentro de la cámara con respecto a las pruebas con la cámara a temperatura ambiente.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El siguiente análisis se realiza con los datos de la prueba 1 con la cámara caliente ya que en dicha prueba se obtuvo una presión de 80 psi aproximadamente; valor que fue el mayor en las pruebas realizadas. El objetivo del análisis es conocer la cantidad de peróxido de hidrógeno que reaccionó y la energía de los productos de la reacción.

Primero se procede a calcular la cantidad del peróxido de hidrógeno que reaccionó. Con el valor del volumen de peróxido de hidrógeno inyectado, se calcula el número de moles de reactivo y la fracción molar de los productos, como se muestra a continuación:

Se tiene una cantidad de aproximadamente 3 cm^3 de H_2O_2 con una concentración de 78 % en volumen; así que, los volúmenes del reactante son:

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O}_2 &= 3 \text{ cm}^3 \times 0.78 = 2.34 \text{ cm}^3 \\ \text{H}_2\text{O} &= 3 \text{ cm}^3 - 2.34 \text{ cm}^3 = 0.66 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Multiplicando los volúmenes por la densidad de cada sustancia se obtienen las masas, las cuales son:

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O}_2 &= 2.34 \text{ cm}^3 \times 1.4 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = 3.276 \text{ gr} \\ \text{H}_2\text{O} &= 0.66 \text{ cm}^3 \times 1 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = 0.66 \text{ gr} \end{aligned}$$

Multiplicando las masas por el peso molecular, se obtienen los moles:

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O}_2 &= 3.276 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ mol}}{34 \text{ gr}} = 0.1 \text{ mol} \\ \text{H}_2\text{O} &= 0.66 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ mol}}{18 \text{ gr}} = 0.037 \text{ mol} \end{aligned}$$

Utilizando la ecuación (1) se calculan las fracciones molares de los productos, los cuales son:

$$\begin{aligned} \text{mol de H}_2\text{O} &= \frac{2 \text{ mol H}_2\text{O} \times 0.1 \text{ mol H}_2\text{O}_2}{2 \text{ mol H}_2\text{O}_2} = 0.1 \text{ mol} \\ \text{mol de O}_2 &= \frac{1 \text{ mol O}_2 \times 0.1 \text{ mol H}_2\text{O}_2}{2 \text{ mol H}_2\text{O}_2} = 0.05 \text{ mol} \end{aligned}$$

Tomando el valor de 11.21 (SENER, 2013) psi para la presión atmosférica, la presiones parciales en los productos de la reacción catalítica son:

$$\begin{aligned} P_{\text{vapor}} &= \left(\frac{0.1}{0.15} \right) (91.21 \text{ psia}) = 60.8 \text{ psia} \\ P_{\text{O}} &= \left(\frac{0.05}{0.15} \right) (91.21 \text{ psia}) = 30.4 \text{ psia} \end{aligned}$$

La ecuación de estado para un gas ideal (Faires, 2007) es:

$$pv = nRT \quad (2)$$

de la cual se despeja la temperatura se obtiene la ecuación (3)

$$T = \frac{pv}{nR} \quad (3)$$

en ésta se sustituyen los valores de las demás variables para el oxígeno de la reacción, que son:

$$p = 30.4 \text{ psia} = 210 \text{ kPa abs.}$$

$$v = 98 \text{ cm}^3 = 98 \times 10^{-6} \text{ m}^3.$$

$$n = 0.05 \text{ mol.}$$

$$R = 8.314472 \frac{\text{m}^3 \text{Pa}}{\text{°K mol}}$$

$$T = \text{Temperatura } \text{°K.}$$

Aplicando las operaciones obtenemos el resultado :

$$T = 49.5 \text{ °K}$$

La temperatura calculada está por debajo de 0 °C , lo cual es incoherente con la medición realizada.

De las variables de la ecuación (3) se conocen con certeza los valores de la presión y el volumen, ya que fueron medidos; sin embargo, se desconoce qué cantidad de peróxido de hidrógeno inyectado reaccionó. Debido a eso se hicieron cálculos variando el número de moles que reaccionó y se obtuvieron resultados consistentes cuando reacciona el 10 % del volumen inyectado.

La temperatura del oxígeno cuando reacciona sólo el 10 % del peróxido de hidrógeno inyectado es:

$$T = 495 \text{ °K}$$

Ahora se calcularán las condiciones del vapor de la reacción. La masa de vapor en los productos, cuando reacciona el 10 % de peróxido de hidrógeno inyectado es:

$$m = 0.01 \text{ mol} \left(18 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \right) = 0.18 \text{ gr} \left(0.001 \frac{\text{Kg}}{\text{gr}} \right) = 1.8 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

por lo tanto el volumen específico es:

$$v = \frac{98 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{1.8 \times 10^{-4} \text{ kg}} = 0.54 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

El valor de la temperatura se obtiene de las tablas de vapor sobrecalentado (O.Mackey, 1949) y es:

$$@ v = 0.54 \frac{m^3}{kg} \quad y \quad P_{vapor} = 420 \text{ kPa}$$

$$T = 500 \text{ }^\circ\text{K}$$

Así la temperatura obtenida de esta manera resultó ser prácticamente igual a la calculada para el oxígeno. La diferencia entre la temperatura teórica y la registrada por la instrumentación se debe al aislante colocado al termopar para evitar que éste hiciera contacto con la cámara catalítica, lo cual provocaba fallas en la medición.

Una vez que se conoce la cantidad de peróxido de hidrógeno inyectado que reaccionó, se procede a calcular la energía de los productos.

La energía del vapor para las condiciones de la reacción se obtiene de las tablas de vapor sobrecalentado, y para las condiciones estándar se obtiene de las tablas de líquido subenfriado (O.Mackey, 1949). Los valores son:

$$@ P_{vapor} = 420 \text{ kPa } y \ T = 500 \text{ }^\circ\text{K}; \ h_2 = 2.91584 \times 10^6 \frac{J}{kg}$$

$$@ P_{agua} = 100 \text{ kPa } y \ T = 288 \text{ }^\circ\text{K}; \ h_1 = 104.877 \times 10^3 \frac{J}{kg}$$

$$h = (h_2 - h_1) = (2.91584 \times 10^6 - 104.877 \times 10^3) = 2.811 \times 10^6 \frac{J}{kg}$$

donde:

h = entalpia específica.

a continuación se calcula la masa de vapor, que es:

$$m = 0.01 \text{ mol} \times 0.018 \frac{kg}{mol} = 0.18 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

multiplicando la entalpia específica por la masa se obtiene la energía del vapor, la cual es:

$$H_{vapor} = \left(2.811 \times 10^6 \frac{J}{kg} \right) (0.18 \times 10^{-3} \text{ Kg}) = 505.98 \text{ J}$$

de la tabla de oxígeno (Cengel, 2011), se obtiene la energía de éste para las condiciones de la reacción y la energía en condiciones estándar.

$$@ T = 500 \text{ }^\circ\text{K}, \ h_2 = 14770 \frac{J}{mol}$$

$$@ T = 288 \text{ }^\circ\text{K}, \ h_1 = 8682 \frac{J}{mol}$$

$$h_m = (h_2 - h_1) = (14770 - 8682) = 6088 \frac{J}{mol}$$

donde:

h_m = entalpia por mol.

los moles de oxígeno cuando reacciona el 10% son:

$$m = 0.05 \text{ mol} \times 0.1 = 0.005 \text{ mol}$$

multiplicando la entalpia-mol por los moles se obtiene la energía del oxígeno, la cual es:

$$H_{\text{vapor}} = \left(6088 \frac{\text{J}}{\text{kg}}\right)(0.005 \text{ mol}) = 30.44 \text{ J}$$

la energía total es la energía del vapor más la energía del oxígeno:

$$H = 30.44 \text{ J} + 505.98 \text{ J} = 536.42 \text{ J} \left(\frac{1 \text{ cal}}{4.181 \text{ J}}\right) = 128.3 \text{ cal}$$

La energía teórica de la reacción se calcula utilizando la ecuación (1) y el número total de moles en los productos, el valor es:

$$H = \left(23.44 \times 10^3 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}\right)(0.015 \text{ mol}) = 351.6 \text{ cal}$$

La diferencia entre el valor teorico y el valor experimental, se puede atribuir a las pérdida por conducción de calor hacia la cámara, el recipiente que contiene el catalizador y las canicas en el interior de la cámara.

4.5 FACTIBILIDAD DE INYECCIÓN DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO EN EL EXPANSOR ROTATORIO

Para evaluar la factibilidad de impulsar el expansor rotatorio inyectando peróxido de hidrógeno líquido atomizado directamente a la cámara de trabajo se toman los resultados de la prueba 1 con la cámara caliente; ya que en tal prueba la presión sube rápidamente de 0 a 50 psi en 0.21 segundos. Con la presión se calculará el par indicado y con el tiempo la velocidad de giro teóricos del expansor rotatorio, para después calcular la potencia indicada del expansor.

Como se explicó en la sección 2.2, los rotores giran 90° por cada ciclo de trabajo; así que, lo productos de la reacción del peróxido de hidrógeno expandirse dentro de este periodo. A mayor velocidad de giro del expansor, los rotores recorrerán un mayor ángulo antes de que la presión pueda elevarse. Con base en un tiempo de 0.21 segundos, se calculó la velocidad de rotación del expansor para diferentes y ángulos de giro de los rotores. Los resultados se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Velocidad de rotación para diferentes ángulos de giro en que se eleva la presión.

Ángulo de giro	Velocidad de giro (RPM)
0	0
5	3.96825397
10	7.93650794
15	11.9047619
20	15.8730159
25	19.8412698
30	23.8095238
35	27.7777778
40	31.7460317
45	35.7142857
50	39.6825397
55	43.6507937
60	47.6190476
65	51.5873016
70	55.5555556
75	59.5238095
80	63.4920635
85	67.4603175

En la tabla 4.1 observamos que a mayor ángulo, mayor será la velocidad de giro; sin embargo, a mayor ángulo, menor será el par. Se supone que la presión se eleva rápidamente dentro de 20° de giro, con lo cual se tendría una velocidad de rotación de 15.8 RPM.

Si el peróxido de hidrógeno se inyecta a los 5° después del PMS, la presión se elevará hasta los 25° de giro después del PMS.

Para conocer el par que se produce bajo estas condiciones, necesitamos calcular el volumen de la cámara y la presión. El volumen de la cámara en función del ángulo de giro se calcula con la ecuación (4) (González, 2013).

$$v = 2r^2d_t \left[2\text{sen}^2\left(\frac{\theta}{2}\right) - (\theta - \text{sen}\theta) \right] \quad (4)$$

en donde:

v = volumen de la cámara de trabajo

r = radio del perfil de los rotores

d_t = separación entre las tapas

θ = ángulo de giro

para el expansor los valores correspondientes son:

$$r = 10.7 \text{ cm.}$$

$$d_t = 6.386 \text{ cm}$$

$$\theta = 35^\circ.$$

por lo tanto el volumen de la cámara es:

$$v = 1.1914 \times 10^{-4} m^3$$

Se calcula la presión utilizando la ecuación (2) y los siguientes valores:

$$T = 500 \text{ }^\circ\text{K.}$$

$$v = 1.1914 \times 10^{-4} m^3.$$

$$n = 0.015 \text{ mol.}$$

$$R = 8.314472 \frac{m^3 Pa}{^\circ K mol}.$$

así que la presión calculada es:

$$p = 523.405 \text{ kPa}$$

El par indicado lo calculamos con la ecuación 5 (Cárdenas, 2013).

$$M_i = 4\sqrt{2} p_c h R^2 \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (5)$$

donde:

M_i = par indicado

p_c = presión en la cámara

h = distancia entre las tapas

R = radio del perfil de los rotores

φ = ángulo de giro

para el expansor del Instituto de Ingeniería los valores son:

$$p_c = 523.405 \text{ kPa.}$$

$$h = 0.06386 \text{ m.}$$

$$R = 0.107 \text{ m.}$$

$$\varphi = 35^\circ = 0.611 \text{ rad}$$

el par indicado para estos valores es:

$$M_i = 300.6 \text{ N} \cdot \text{m}$$

La potencia se calcula con la ecuación 6.

$$Pot = \omega \cdot M_i \quad (6)$$

donde:

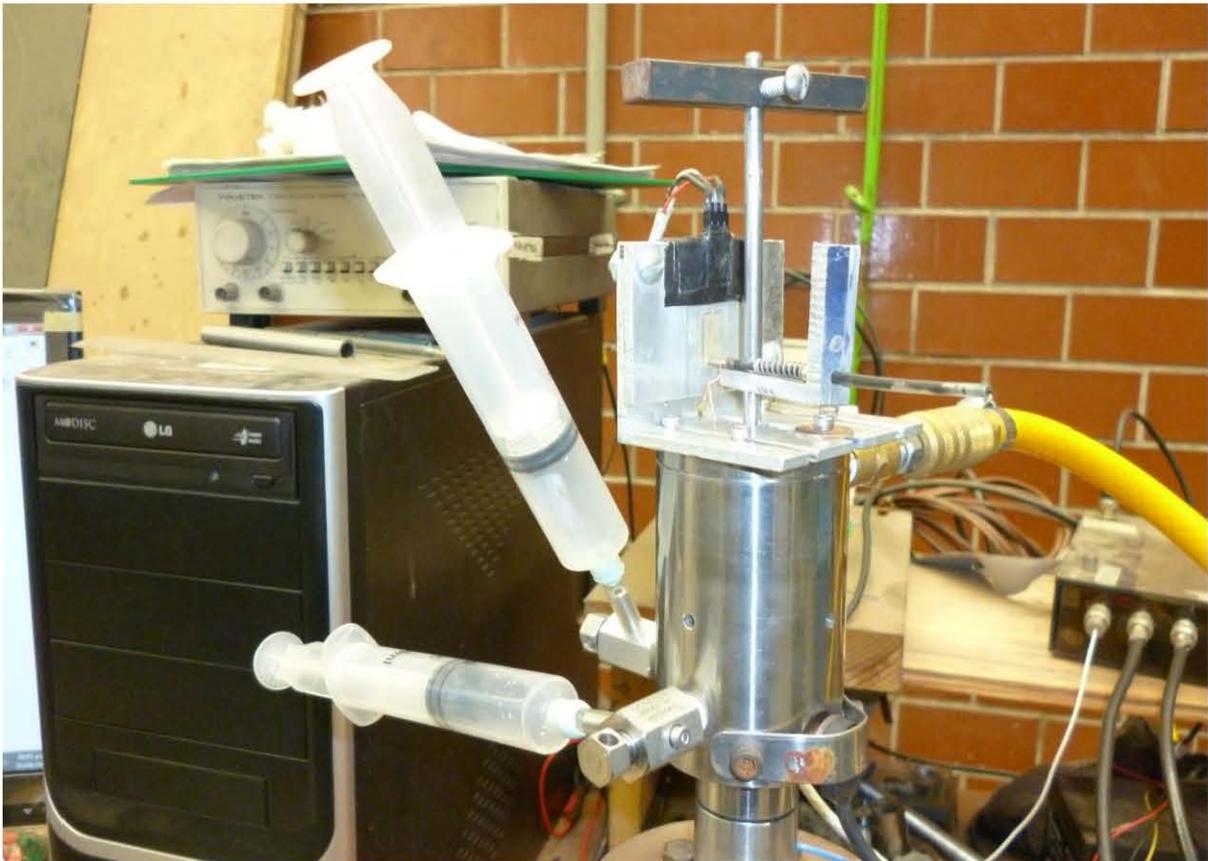
$$M_i = 300.6 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\omega = 15.8 \frac{\text{rev}}{\text{min}} = 1.65 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

con estos valores la potencia es igual a:

$$Pot = 496 \text{ W} = 0.665 \text{ HP}$$

5 CONCLUSIONES



5.1 CONCLUSIONES GENERALES

Se hizo una recopilación del trabajo hecho en el proyecto del expansor rotatorio, desde el inicio de éste hasta la década de 2010.

Se diseñó y se fabricó un banco de pruebas para inyectar peróxido de hidrógeno atomizado en una cámara de volumen fijo que contiene catalizador. El banco de pruebas consiste de tres sistemas, que son: inyección, instrumentación y adquisición de datos.

Se diseñó y se fabricó un sistema de inyección que utiliza aire comprimido para impulsar un émbolo que aplica presión al peróxido para hacerlo salir del inyector. Se modificaron e integraron elementos de proyectos anteriores al banco de pruebas, dichos elementos son: cámara catalítica e inyector.

Se instrumentó el banco de pruebas para hacer las siguientes mediciones: temperatura dentro de la cámara, presión dentro de la cámara, presión de inyección del peróxido y posición del émbolo.

Se construyeron los acondicionadores de señal necesarios para ingresar a una tarjeta de adquisición de datos las mediciones de los sensores.

Se diseñó y se elaboró un programa que adquiere las señales de los sensores, las convierte a las unidades necesarias, las muestra en pantalla y las almacena en la computadora para su posterior análisis.

Las pruebas de inyección de se realizaron utilizando peróxido de hidrógeno al 78% de concentración en volumen. Se realizaron pruebas con la cámara y el catalizador a temperatura ambiente, y con la cámara y catalizador precalentados.

Los resultados de las pruebas fueron analizados para conocer la cantidad de peróxido de hidrógeno inyectado que reaccionó y la energía de la reacción. Los resultados del análisis revelan que de la cantidad de reactante inyectado, sólo el 10% reacciona.

La presión máxima obtenida en las pruebas fue de 79.2 psi, la cual puede impulsar al expansor; sin embargo, el tiempo de la reacción limita al expansor a una velocidad de giro de máximo 67.4 RPM.

El aumento de temperatura de la cámara catalítica y el catalizador hacen que la reacción sea más rápida. En las pruebas realizadas, con diferencia de 75 °C, las de mayor temperatura fueron dos veces más rápidas. La temperatura dentro de la cámara catalítica se elevó más de 200 °C en una de las pruebas con la cámara precalentada, y más de 100 °C con la cámara a temperatura ambiente, esto indica que se puede utilizar la reacción para precalentar la cámara y el catalizador y así acelerar la reacción.

Se hizo un análisis con base en los resultados de las pruebas, de la factibilidad de impulsar el expansor rotatorio con inyecciones de peróxido de hidrógeno atomizado directo en la cámara de trabajo. Se concluye que bajo las condiciones en las que se realizaron las pruebas, la reacción puede impulsar al expansor rotatorio a una velocidad de rotación baja y desarrollar una potencia de 496 W.

5.2 TRABAJO A FUTURO Y RECOMENDACIONES

En el banco de pruebas fabricado se pueden utilizar para probar diferentes catalizadores en busca de alguno con el cual la reacción sea más rápida y se descomponga una mayor cantidad de peróxido de hidrógeno que la que se logró descomponer en las pruebas.

Se recomienda utilizar un sensor de presión estático ya que el sensor de presión dinámico utilizado no registra algunos cambios de presión que son demasiado lentos para el funcionamiento de éste.

La temperatura de la reacción alcanza los 500 °C, por lo que se recomienda seleccionar materiales y componentes que resistan esta temperatura.

Se recomienda cambiar el diseño del inyector, ya que una cantidad de peróxido de hidrógeno queda contenido en él después de cada inyección, esto provoca que la presión aumente dentro del inyector lo cual puede provocar un accidente. Se recomienda colocar válvulas de alivio de algún material que no acelere descomposición del peróxido de hidrógeno.

Cuando se maneje peróxido de hidrógeno, se debe utilizar siempre el equipo de seguridad. El diseño de los sistemas de alimentación deben ser tal que eviten el contacto del peróxido de hidrógeno con las personas. Después de manipular esta sustancia, se deben lavar con abundante agua todas las herramientas que hayan estado en contacto con ella para evitar que queden residuos. Si el peróxido de hidrógeno moja algún papel o tela, se recomienda que antes de desecharlo se lave con abundante agua, ya que de no hacerlo se pueden incendiar.

Se recomienda realizar pruebas en las cuales se precaliente sólo el catalizador, ya que al estar el sistema de inyección a temperatura superior a la del ambiente, se dificulta purgar el sistema y realizar las pruebas. Una posibilidad para precalentar el catalizador es aplicar un pulso eléctrico a éste.

El hecho de que las altas temperaturas aceleren la descomposición del peróxido de hidrógeno, hace atractiva la posibilidad de inyectarlo en un motor diesel; ya que en éste la temperatura al final de la compresión es del orden de los 700 °C (Faires, 2007). Otra posible aplicación en un motor diesel es inyectar una mezcla de diesel con peróxido de hidrógeno de alta concentración, cabe mencionar que tal experimento fue realizado en la India pero utilizando peróxido de hidrógeno de baja concentración (5%), obteniendo mejoras en la eficiencia térmica del motor y reducción de emisiones contaminantes. (<http://www.academia.edu>, 2013).

Es de interés realizar el mismo experimento pero con peróxido de hidrógeno de mayor concentración. Lamentablemente para las pruebas realizadas no se tuvo disponible peróxido de hidrógeno de concentración mayor a 78 %.

Para el sistema de inyección en el expansor se recomienda un control electrónico ya que la tecnología para implementarlo es accesible y éste tipo de control es más versátil que un control mecánico.

El expansor rotatorio puede ser impulsado por los productos de la disociación del peróxido de hidrógeno provenientes de una cámara catalítica externa al motor, con la ventaja de que se dispone de mayor tiempo para que la reacción se lleve a cabo.

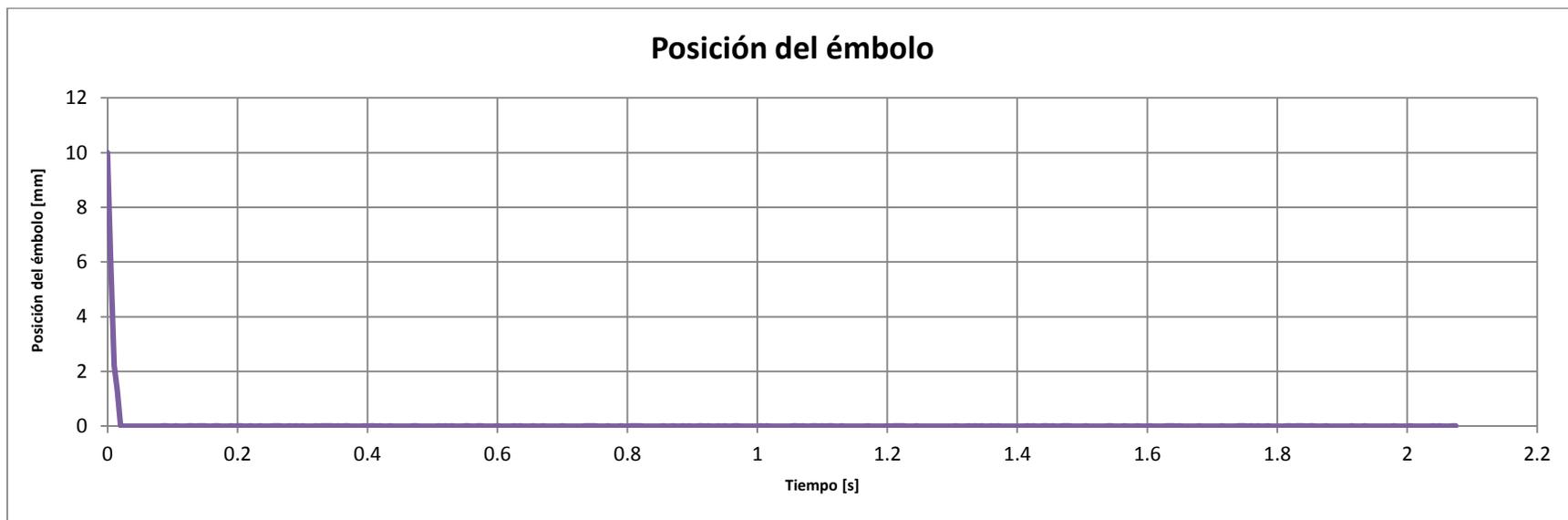
Referencias

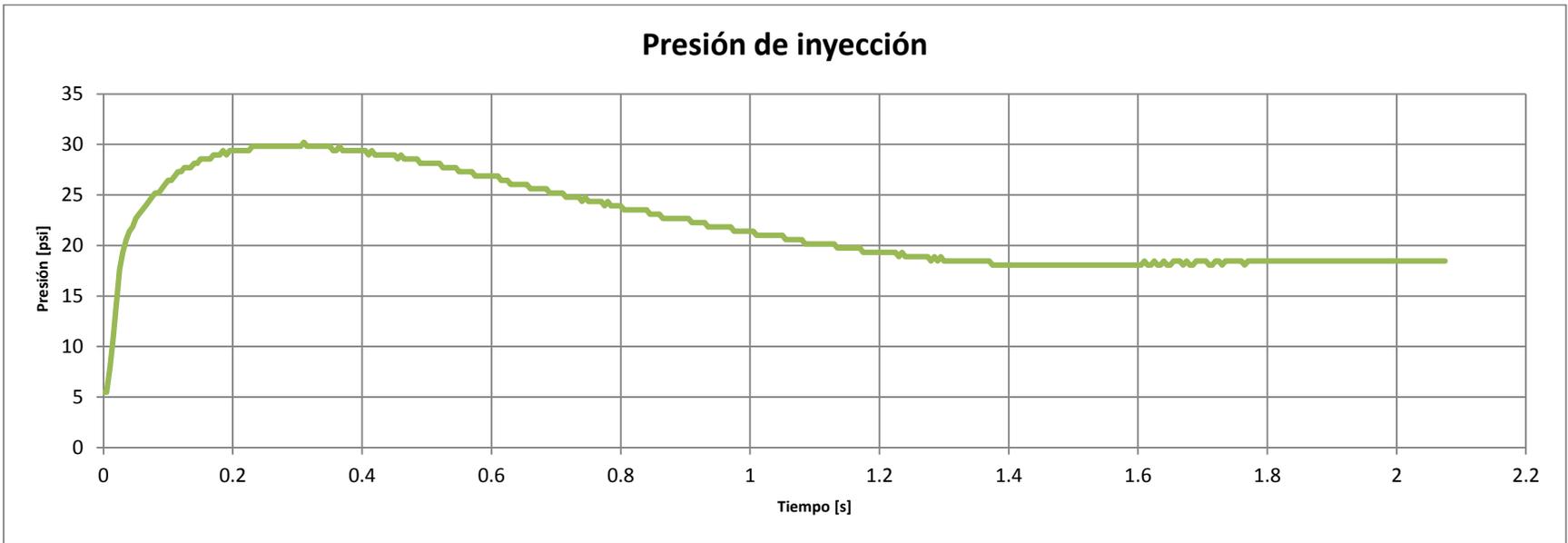
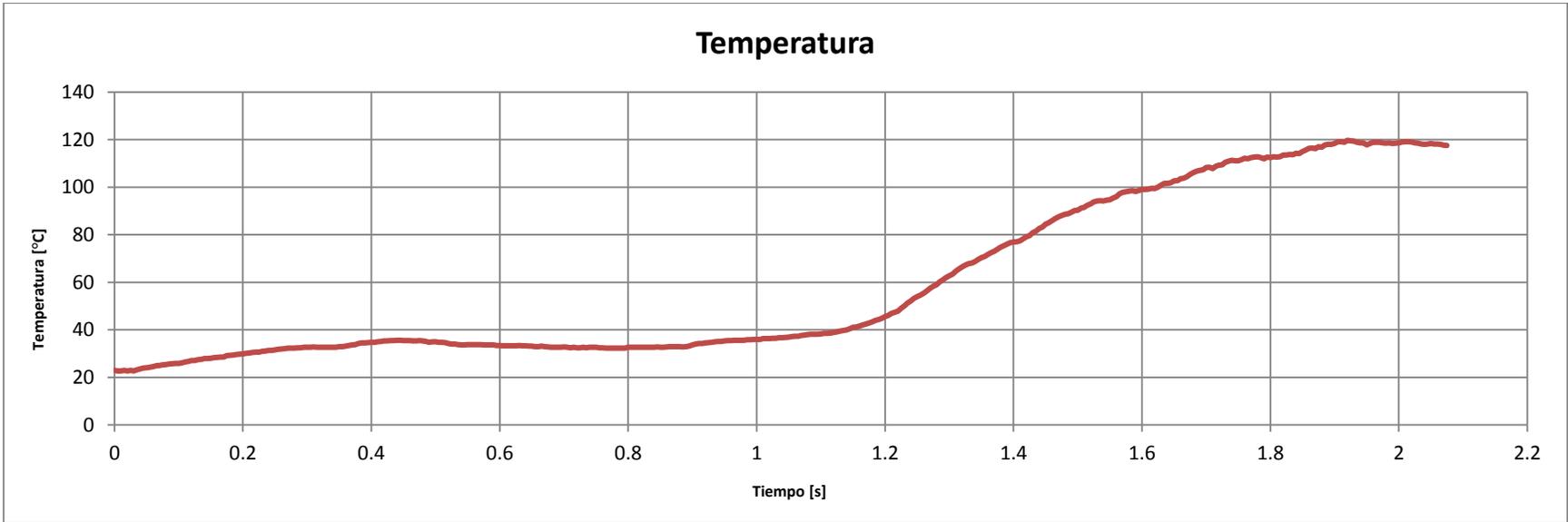
- Cárdenas, M. I. (06 de 2013). Análisis Experimental de un Expansor Rotatorio. México, México: UNAM.
- Cengel, Y. A. (2011). *Thermodynamics an engineering approach 7th*. New York: McGraw Hill.
- Chicurel, R. (1979). DEVELOPMENT OF A NOVEL ENGINE. *ELEVENTH INTERSOCIETY ENERGY CONVERSION ENGINEERING CONFERENCE*, (págs. 73-79).
- Chicurel, R. (1980). PRUEBAS DINAMOMÉTRICAS DE UN MOTOR ROTATORIO DE VAPOR. *VI Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería*, (págs. 213-215).
- Chicurel, R. (31 de 03 de 2010). Sealing system for a rotary expander. ELSEVIER.
- Chicurel, R. (2011). Rotary expander for operation with waste or solar derived heat. *13th World Congress in Mechanism Science*, (págs. 19-25). Guanajuato.
- Faires, V. (2007). *Termodinámica*. México: LIMUSA.
- González, A. (13 de 10 de 2013). Investigación teórica-experimental de un motor rotatorio de desplazamiento positivo. México: UNAM.
- <http://es.wikipedia.org>. (11 de 05 de 2012). Obtenido de Wikipedia: http://es.wikipedia.org/wiki/Cintur%C3%B3n_cohete
- <http://www.academia.edu>. (10 de 10 de 2013). Obtenido de http://www.academia.edu/1999665/EFFECT_OF_INJECTING_HYDROGEN_PEROXIDE_INTO_DIESEL_ENGINE
- <http://www.hydrogencarsnow.com>. (10 de 05 de 2012). Obtenido de HydrogenCars&Vehicles: <http://www.hydrogencarsnow.com/blog2/index.php/hydrogen-fuel-production/hydrogen-peroxide-fuel-for-automobiles/>
- <http://www.peroxidepropulsion.com/>. (10 de 05 de 2012). Obtenido de PeroxidePropulsion: <http://www.peroxidepropulsion.com/>
- <http://www.youtube.com>. (15 de 04 de 2012). Obtenido de YouTube: <http://www.youtube.com/watch?v=evjd49r52tg>
- <http://www.youtube.com>. (15 de 04 de 2012). Obtenido de YouTube: <http://www.youtube.com/watch?v=PPS62FcE4K4>
- O.Mackey, F. O. (1949). *Thermodynamic Charts*. Jhon & Soons Inc.
- SENER. (2013). *SENER*. Obtenido de <http://www.sener.gob.mx/webSener/portal/Default.aspx?id=1640>
- USPeroxide. (13 de 10 de 2013). *USPeroxide Technologies for Clean Enviroment*. Obtenido de <http://www.h2o2.com/technical-library/physical-chemical-properties/thermodynamic-properties/default.aspx?pid=39&name=Decomposition-Heat-Free-Energy-and-Equilibrium-Constant>

ANEXO

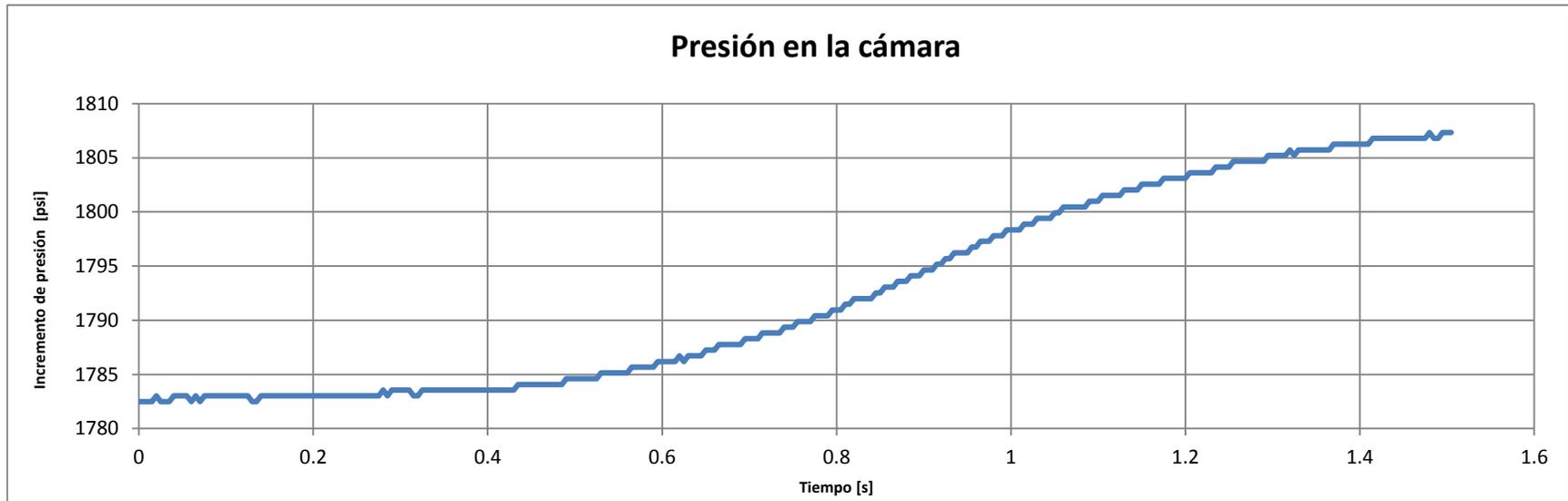
GRÁFICAS DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE INYECCIÓN DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO

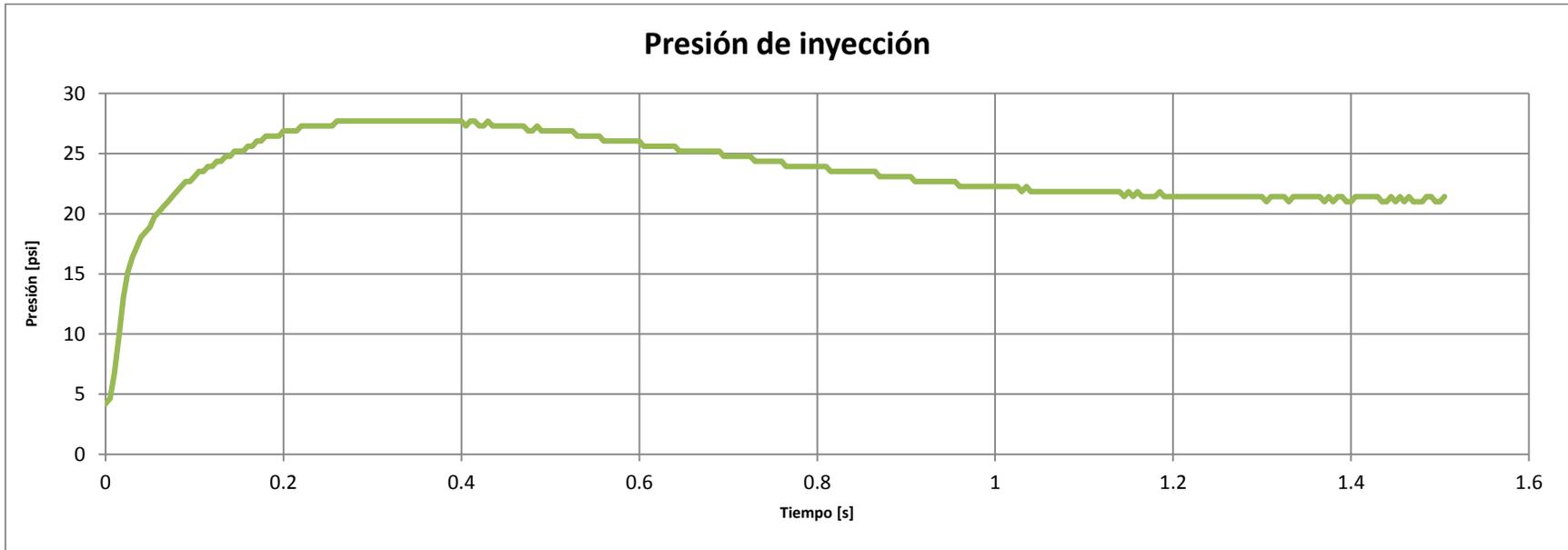
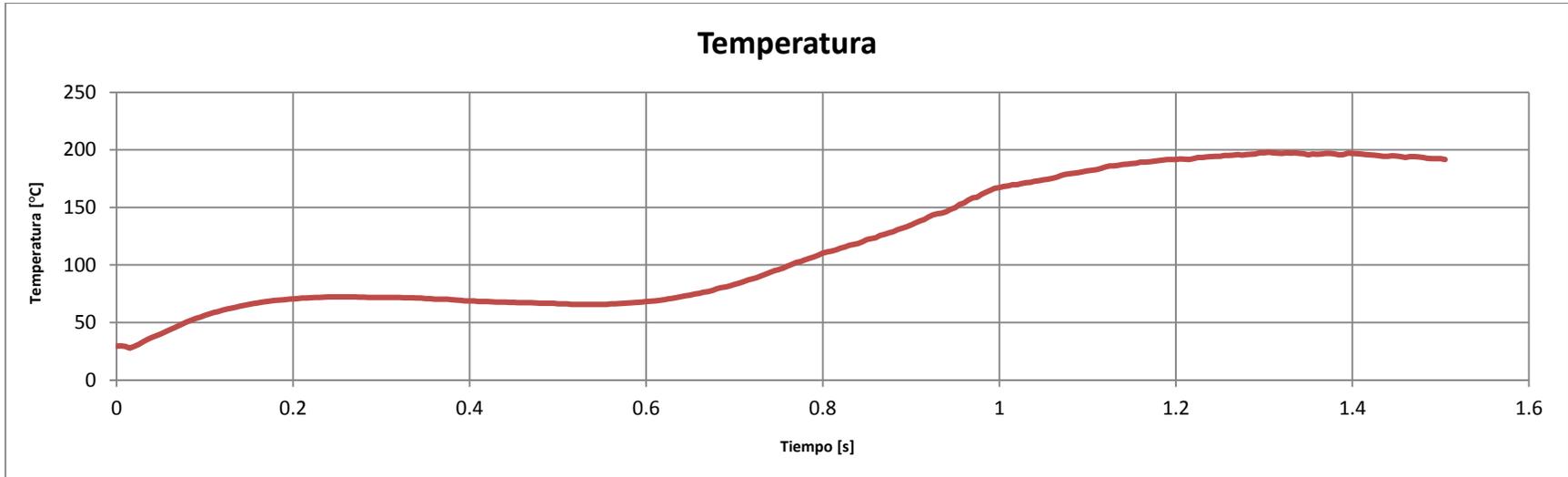
Prueba 1 con la Cámara a Temperatura Ambiente.



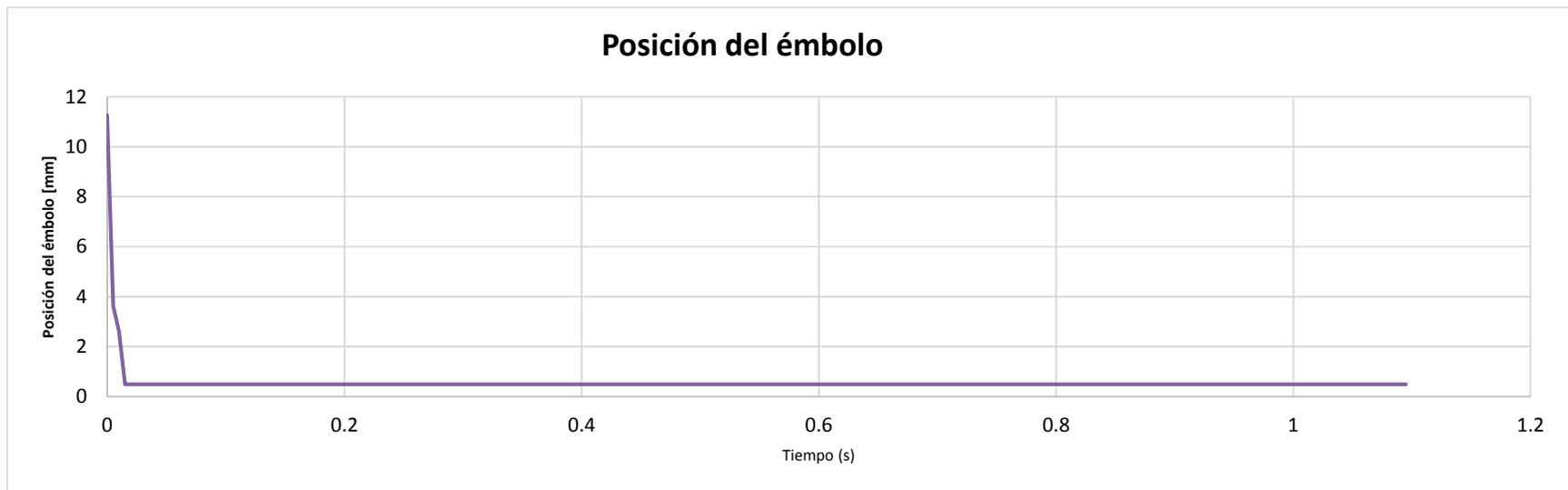
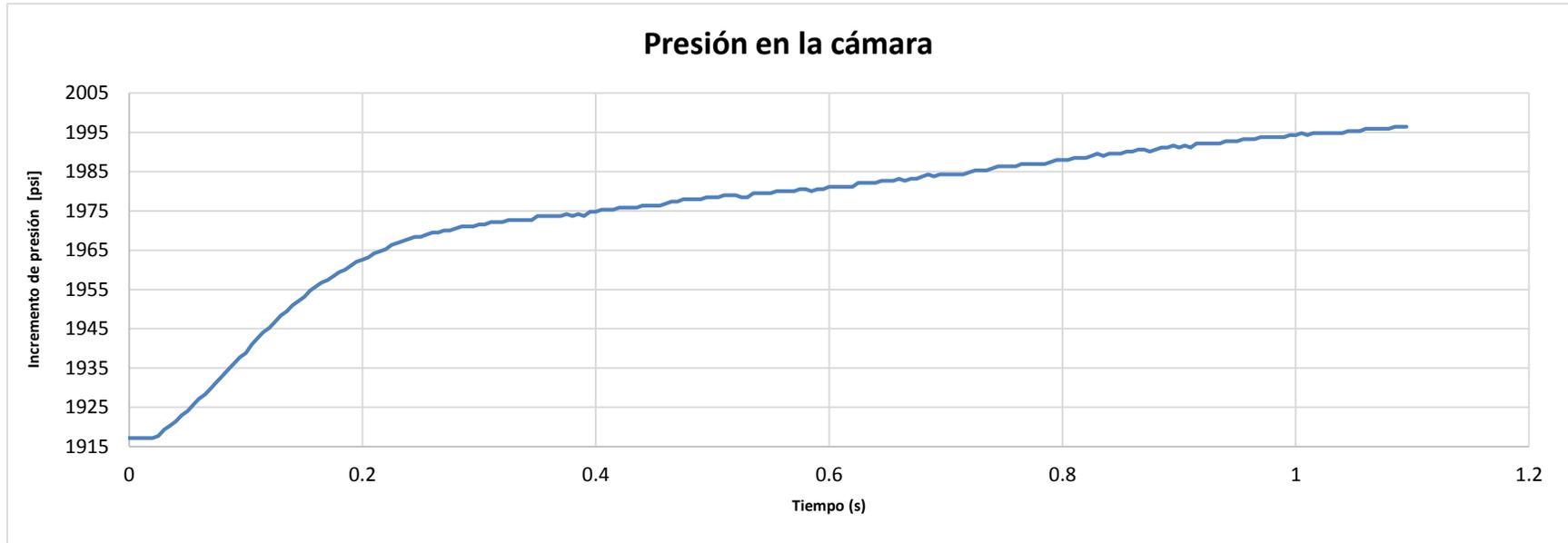


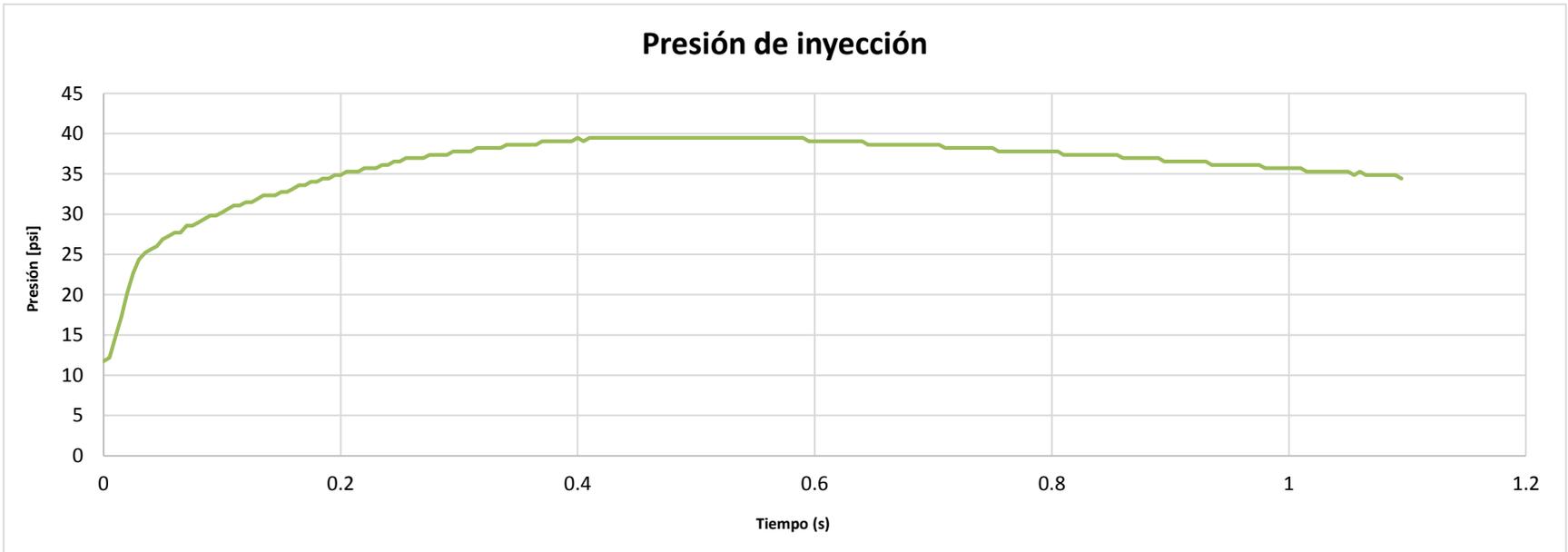
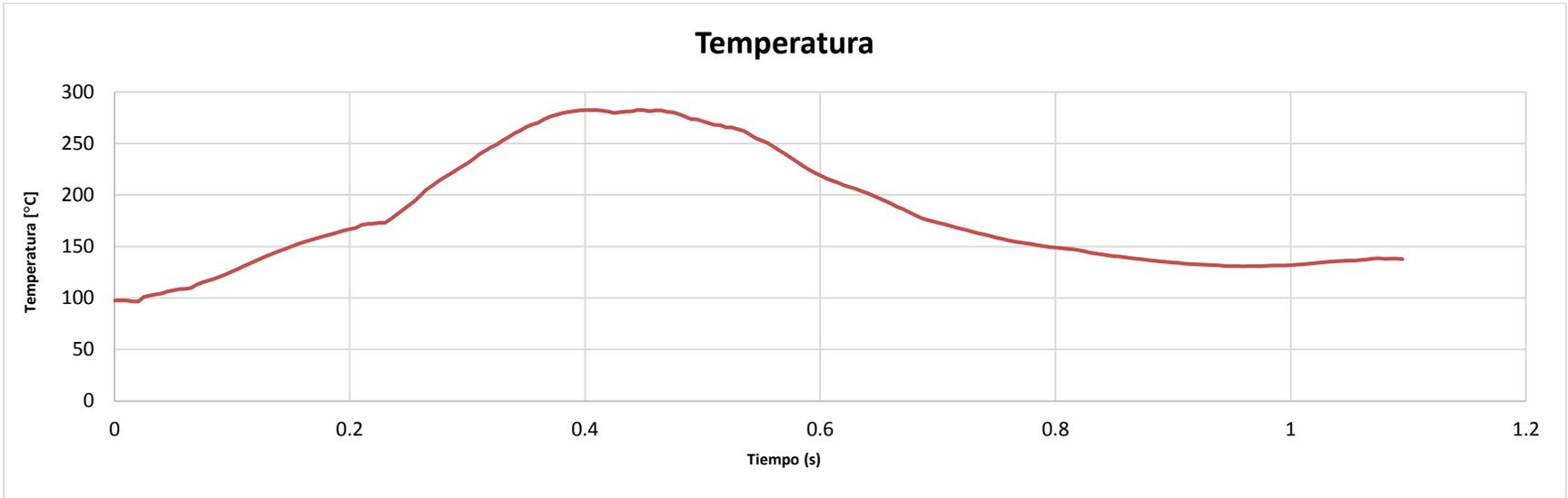
Prueba 2 con la Cámara a Temperatura Ambiente





Prueba 1 con la Cámara Caliente





Prueba 2 con la Cámara Caliente

