

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BOMBA SIN PISTÓN
PARA LA PROPULSIÓN DE COHETES**

**FERNEY SIERRA GALINDO
ANA MARÍA ALEXANDRA MORENO VARGAS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE - GIEMA
BUCARAMANGA**

2010

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BOMBA SIN PISTÓN
PARA LA PROPULSIÓN DE COHETES**

**FERNEY SIERRA GALINDO
ANA MARÍA ALEXANDRA MORENO VARGAS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
INGENIERO MECÁNICO**

**Director
DAVID ALFREDO FUENTES DÍAZ
Doctor**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE - GIEMA
BUCARAMANGA**

2010

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darnos la vida y los recursos necesarios para poder culminar con éxito los estudios realizados

A la Universidad Industrial de Santander, y a la Escuela de Ingeniería Mecánica por haberse convertido en nuestro centro de desarrollo personal y eje de nuestro proyecto de vida.

A los docentes de toda la carrera, en cada una de las asignaturas por sus conocimientos y aportes en nuestro continuo proceso educativo.

Al Doctor David Alfredo Fuentes Díaz porque sin su valiosa colaboración no hubiese sido posible la realización de este proyecto.

A la Fuerza Aérea Colombiana.

A los familiares, amigos y compañeros de estudio, por esa voz de aliento y apoyo necesario para la culminación de nuestros estudios y el desarrollo del proyecto.

Dedicatoria

A esa fuerza divina que está más allá de nuestra comprensión, porque me ayudo a estar en el lugar indicado en el momento indicado.

A mis padres que con su esfuerzo y ejemplo me dieron no solo la oportunidad de buscar mi superación personal sino también una razón para ser mejor persona.

A mis hermanos porque a su manera hicieron posible que hoy me encuentre donde estoy.

A mi compañera de proyecto, porque gracias a su personalidad y su filosofía de hacer las cosas en el momento este proyecto llegó a buen final y además por ser una amiga de calidad.

Al centro de cómputo de ingeniería mecánica, allí pase momentos para añorar por siempre.

A Abigail García, mi novia, porque me enseñó que "cuando uno quiere algo busca la forma" y porque su apoyo fue fundamental para lograr la finalización de mis materias y este proyecto de grado.

Fersigal im.

Dedicatoria

A Dios quién siempre me ha dado la fortaleza necesaria para afrontar todo lo que me propongo y se me presente. Gracias

A mis padres Myriam y Henry, quienes con su amor, ejemplo y apoyo me han hecho una niña y mujer muy feliz.

A mi familia por su incondicionalidad y preocupación. Ustedes siempre hacen que las cosas sean más fáciles

A mis mejores amigas Zully y Diana con quienes compartí toda la universidad. Que sea para toda la vida, las quiero mucho.

A mis compañeros de Centro de Cómputo donde aprendí a trabajar en grupo y viví momentos inolvidables.

A mis compañeritas y compañeros de Decanatura, ustedes se convirtieron en mi segunda familia. Decano gracias por su apoyo y darme la oportunidad de conocerlos

A Fundeproyes quienes me dieron la oportunidad de abrirme como líder, y por tenerme tanta paciencia. Muchachos no los olvidaré.

A mi bello compañero de proyecto por ser compañero, amigo y hermano, le doy gracias a Dios por haberte colocado en mi camino, gracias por tu incondicionalidad, comprensión y sobre todo por tu amistad. Tú me enseñaste que todo se puede, sólo basta con tener un taller. Y recuerda TDS!

A.M.A

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. PROPULSIÓN DE COHETES	20
1.1 DINÁMICA DE PROPULSIÓN	23
2. FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	32
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO	35
3. DIMENSIONAMIENTO	39
3.1 TANQUE DE ALMACENAMIENTO	39
3.1.1 Espesor pared del tanque	41
3.2 CÁMARAS DE BOMBEO	44
3.2.1 Espesor pared de las cámaras de bombeo	44
3.3 ESPESOR TAPAS PARA RECIPIENTES A PRESIÓN	45
3.3.1 Tapas cámaras de bombeo	47
3.3.2 Tapas tanque de almacenamiento	47
4. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN	49
4.1 CONSTRUCCIÓN DE LAS CÁMARAS DE BOMBEO	51
4.2 MONTAJE DE LA CÁMARA DE BOMBEO A LA BRIDA INFERIOR	52
4.3 ESTRUCTURA SOPORTE	53
4.4 MONTAJE BRIDA SUPERIOR Y ANCLAJE	54
4.5 CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE CONTROL	56
4.6 ADECUACIÓN INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN (CAUDALIMETRO Y MANÓMETRO)	56
4.7 ENSAMBLE TERMINADO	57

5. PRUEBAS Y ANÁLISIS	59
5.1 ANÁLISIS DEL MANEJO DE CONTROLES	60
5.2 PRUEBA No 1	63
5.2.1 Análisis de la Prueba No 1	64
5.2.1.1 Análisis de Presurización de las líneas de descarga	65
5.2.1.2 Análisis de llenado y descarga de cada CB	66
5.3 PRUEBA No 2	68
5.3.1 Análisis de la Prueba No 2	68
5.4 PRUEBA No 3	69
5.4.1 Análisis de la Prueba No 3	69
5.5 PRUEBA No 4	69
5.5.1 Análisis de la Prueba No 4	70
5.6 PRUEBA No 5	70
5.6.1 Análisis de la Prueba No 5	71
5.7 PRUEBA No 6	71
5.7.1 Análisis de la Prueba No 6	72
5.8 PRUEBA No 7	72
5.8.1 Análisis de la Prueba No 7	73
5.9 PRUEBA No. 8	73
5.9.1 Análisis de la Prueba No 8	74
5.10 PRUEBA No 9	74
5.10.1 Prueba No 9a	75
5.10.1.1 Análisis Prueba No 9a	75
5.10.2 Prueba No 9b	75
5.10.2.1 Análisis Prueba No 9b	76
5.10.3 Prueba No 9c	76
5.10.3.1 Análisis Prueba No 9c	77
5.10.4 Prueba No 9d	78
5.10.4.1 Análisis Prueba No 9d	79

5.11 ANÁLISIS GENERALES	79
6. CONCLUSIONES	82
7. RECOMENDACIONES	84
BIBLIOGRAFÍA	85

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Unidades fundamentales de un cohete de propulsor líquido.	
1a Presión alimentada. 1b Suministro mecánico 1c Bomba sin pistones	22
Figura 2. Empuje producido por la liberación de gases a alta temperatura	23
Figura 3. Fuerzas en un cohete	24
Figura 4. Efecto de la relación de presión contra el empuje	27
Figura 5. Empuje vs tiempo	28
Figura 6. Esquema de funcionamiento del prototipo	33
Figura 7. Esquema Válvula direccional	33
Figura 8. Complemento de la figura 7. Llenado y descarga de una de las cámaras de bombeo	34
Figura 9. Ensamble del prototipo	35
Figura 10. Esquema neumático	36
Figura 11. Sistema hidráulico	37
Figura 12. Estructura soporte	37
Figura 13. Detalle unión: estructura de soporte-tanque-bridas	38
Figura 14. Dimensiones Tanque Principal	40
Figura 15. Diseño y calculo de recipientes a presión	46
Figura 16. Construcción de las cámaras de bombeo	52
Figura 17. Montaje de la cámara de bombeo a la brida inferior	53
Figura 18. Soporte	54
Figura 19. Montaje brida superior	55
Figura 20. Anclaje	55
Figura 21. Construcción del banco de control	56
Figura 22. Caudalímetro y Manómetro	57
Figura 23. Producto terminado	58
Figura 24. Conexión sistema neumático con el hidráulico	59

Figura 25. Prueba No 1	63
Figura 26. Gráfica Prueba No 1	63
Figura 27. Denominación de las cámaras de bombeo	64
Figura 28. Gráfica de análisis de descarga de cada CB	65
Figura 29. Gráfica de Volumen Vs tiempo (llenado y descarga) de CB1	66
Figura 30. Gráfica de Volumen Vs tiempo (llenado y descarga) de CB2	67
Figura 31. Gráfica de comparación del funcionamiento de las cámaras de bombeo	67
Figura 32. Gráfica Prueba No 2	68
Figura 33. Gráfica Prueba No 3	69
Figura 34. Gráfica Prueba No 4	70
Figura 35. Gráfica Prueba No 5	71
Figura 36. Gráfica Prueba No 6	72
Figura 37. Gráfica Prueba No 7	73
Figura 38. Gráfica Prueba No 8	74
Figura 39. Gráfica Prueba No 9a	75
Figura 40. Gráfica Prueba No 9b	76
Figura 41. Gráfica Prueba No 9c	77
Figura 42. Gráfica de las CB descargando simultáneamente	78
Figura 43. Gráfica Prueba No 9d	78

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tabla comparativa sistemas de presurización	31
Tabla 2. Propiedades del acrílico.	43
Tabla 3. Propiedades mecánicas policarbonato.	45
Tabla 4. Resumen de los valores de construcción del prototipo	48
Tabla 5. Partes del prototipo	49
Tabla 6. Secuencia y análisis del manejo de controles	61
Tabla 7. Análisis del manejo de controles	80

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Planos	86
Anexo B. Datos de las pruebas realizadas	92

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BOMBA SIN PISTÓN PARA LA PROPULSIÓN DE COHETES.*

**AUTORES: FERNEY SIERRA GALINDO
ANA MARÍA ALEXANDRA MORENO VARGAS****

PALABRAS CLAVES: impulso, propulsión, neumática, hidráulica, cohete, pruebas.

DESCRIPCIÓN:

Para un país en pleno desarrollo económico y tecnológico como Colombia no es adecuado depender de otros países para garantizar la evolución de sus capacidades, además es bien sabido que en la actualidad el manejo de la información de primera mano y el tránsito de la misma a la mayor brevedad posible significa cumplir con las exigencias mundiales para interactuar sin desventaja. Es debido a esto que la Fuerza Aérea Colombiana en trabajo conjunto con la Universidad Industrial de Santander a través del grupo de investigación en Energía y Medio ambiente- GIEMA, emprendieron la labor de actualizar telecomunicaciones buscando la ubicación del primer satélite netamente nacional en la órbita baja en la tierra, para tal cometido a iniciado el desarrollo de un cohete que tenga la capacidad de cumplir con este trabajo.

El desarrollo de un sistema de transporte tan sofisticado se tiene que desarrollar de vario puntos de acción que de forma conjunta abarquen el sistema de navegación, parte estructural, aerodinámica y sistema de propulsión.

Este proyecto propone una forma económica y eficiente de presurizar un fluido que pueda ser aplicado en el sistema de propulsión de cohetes. El proyecto se dividió en cuatro fases: investigación, diseño, construcción y pruebas, tomando como variables de evaluación de la viabilidad del proyecto la presión y el flujo másico por ser las determinantes de este tipo de sistemas.

Por lo tanto, este trabajo aporta un punto de partida para el desarrollo de tecnologías en el campo Aeroespacial además alimenta la información que al respecto se maneja en nuestro país motivando nuevos investigadores a vincularse a este campo y así llegar a ser el punto de referencia en esta materia para toda centro y sur América.

* Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.
Director: David Alfredo Fuentes Díaz

ABSTRACT

TITLE: DESING AND CONSTRUCTION OF PISTONLESS PUMP PROTOTYPE FOR PROPULSION ROCKETS*

AUTHORS: FERNEY SIERRA GALINDO
ANA MARÍA ALEXANDRA MORENO VARGAS**

KEY WORDS: impulse, propulsion, pneumatic, hydraulic, rocket, tests

DESCRIPTION:

For a country in full economic, technological and Colombia is not appropriate to rely on other countries to ensure the development of their capabilities, is also well known that at present the management of first-hand information and transit it to the as soon as possible means to meet the global demands to interact without disadvantage. It is because of this that the Colombian Air Force in working with the University of Western Australia through the research group Energy and Environment-GIEM, undertook efforts to update the location of telecommunications seeking purely national first satellite in low orbit on earth, for this task to initiate the development of a rocket that has the capability of carrying out this work.

The development of a sophisticated transport system must be developed from various points of action that together encompass the navigation system, some structural, aerodynamic and propulsion system.

This project proposes a very economical and efficient pressurized fluid that can be applied in the rocket propulsion system. The project was divided into four phases: research, design, construction and testing, taking as variables for evaluating the viability of the project the pressure and mass flow to be the determinants of such systems.

Therefore, this paper provides a starting point for the development of aerospace technologies in the field also feeds information about driving in our country by encouraging new researchers to be linked to this field and thus become the reference point this matter for all Central and South America.

* Theses

**Physicomechanical Engineering Faculty. Mechanical Engineering School.
Director: David Alfredo Fuentes Díaz

INTRODUCCIÓN

Es necesario que Colombia busque eliminar su dependencia tecnológica de otros países, ya que esta dependencia no sólo genera altos costos de producción sino también limita sus posibilidades de desarrollo y competitividad.

La Fuerza Aérea Colombiana (FAC) a través del Centro de Investigación en Tecnología Aeronáutica (CITA) se ha planteado como uno de sus proyectos enviar un satélite a la estratosfera. Para lograr ese objetivo, el CITA debe construir un cohete que pueda llevar dicho dispositivo a una órbita baja, pero la tecnología de cohetes en Colombia se encuentra en estado incipiente, no se cuenta con la experiencia ni con el conocimiento necesario, además, está el inconveniente de la difícil adquisición de esta tecnología, ya sea por su alto costo o por que se le considera “alta tecnología” o de “secreto de estado”.

Es allí donde este proyecto se presenta como generador de conocimiento en el campo de la propulsión de cohetes a partir de la investigación en presurización de fluidos.

Con el sistema de presurización aquí planteado se busca verificar el comportamiento del flujo másico y la presión entregadas por el prototipo, dado que estos dos factores afectan sustancialmente el funcionamiento y la estabilidad del cohete. Por esta razón este proyecto se centra en buscar una forma económica y eficiente de presurizar un fluido.

1. PROPULSIÓN DE COHETES¹

Los cohetes son vehículos impulsados por gases provenientes de reacciones de combustión que ocurren en su interior, y son expulsados a altas velocidades. Entre las ventajas que posee frente a otros métodos de propulsión, es la no dependencia de la existencia de una atmósfera que los rodee; tanto el combustible como el oxidante necesario para la combustión son transportados por el mismo cohete, razón que los hace perfectos para las aplicaciones de propulsión aeroespacial.

Los cohetes se dividen en dos tipos; los de combustible líquido y los de combustible sólido. En los primeros, los propulsores, combustible y oxígeno, se almacenan por separado, y luego se llevan a la cámara de combustión donde ocurre la ignición, en estos, la combustión se puede controlar o cortar en cualquier momento. En los cohetes de combustible sólido, los propulsores se combinan y se “empacan” en una barra sólida, en estos la combustión no se detiene hasta que toda la barra ha sido consumida.

En términos del tipo de combustible, los cohetes de combustible líquido se pueden dividir entre: bipropulsores y monopropulsores; en los primeros el oxidante y el combustible son atomizados de forma independiente a la cámara de combustión, en el segundo se atomiza una mezcla de oxidante y combustible en la cámara de combustión como una sola sustancia. Otra forma de agrupar los cohetes es por el método de encendido o ignición, la cual se presenta de dos formas; al usar dos fluidos que al ser mezclados entre sí son auto-combustibles y el que requiere de una chispa piloto que da inicio a la ignición.

¹ Hill, Philip G., and Peterson, Carl R. Mechanics and Thermodynamics of Propulsion. 2 ed. Editorial Prentice Hall. Addison-Wesley, 1965.

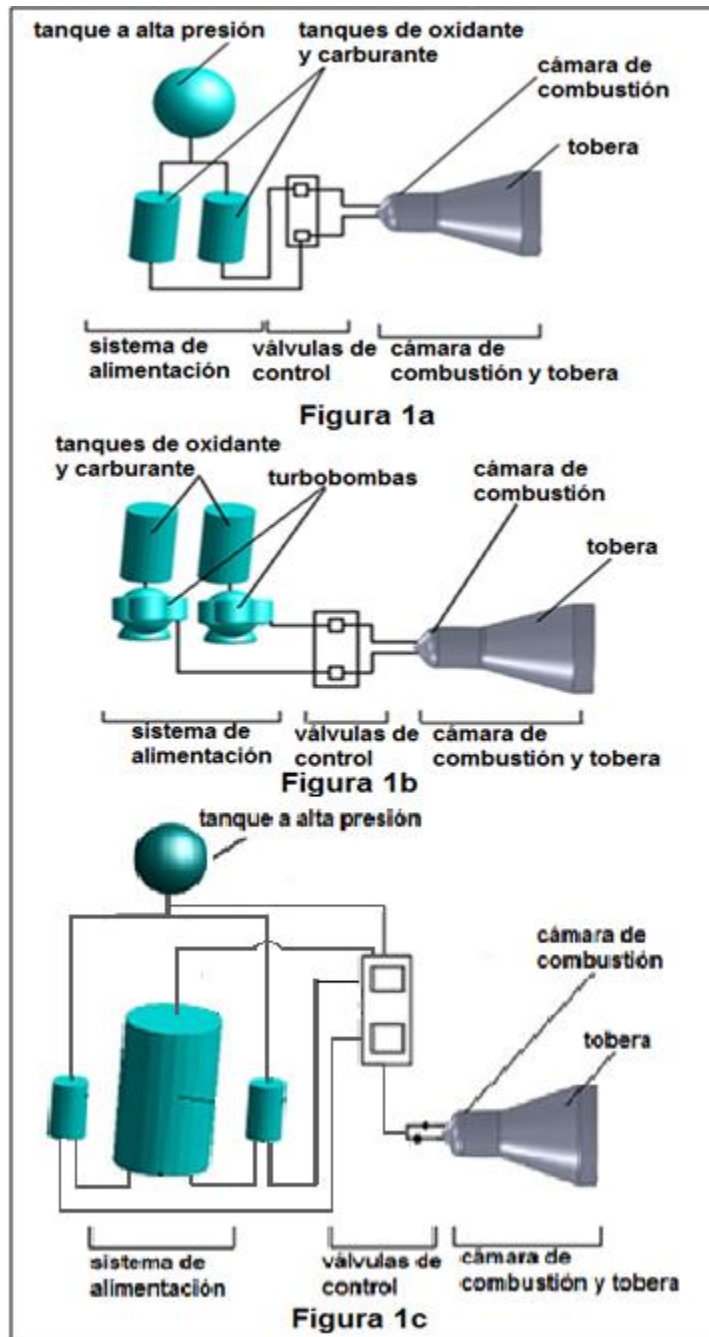
Los cohetes con propulsor líquido usan tres métodos para obtener la presión adecuada y hacer fluir el combustible. Un método es el de presión alimentada; el cual consta de un tanque con un gas inerte a alta presión, que va conectado a los tanques de almacenamiento del oxidante y combustible, (*ver figura 1a*), el otro es un sistema que cuenta con una turbo-bomba para cada tanque de almacenamiento, (*ver figura 1b*), y por último el sistema de presurización de bomba sin pistones, donde el tanque de almacenamiento hace parte del sistema de bombeo, (*ver figura 1c*).

El sistema propulsor de un cohete se puede dividir en tres unidades fundamentales (*ver figura 1*):

- a. Sistema de alimentación:
- b. Válvulas de control: se usa como el medio de control de flujo.
- c. Conjunto cámara de combustión y tobera

El método de presurización por presión alimentada es usado para pequeños vehículos, debido a su sencillez de construcción y operación, pero posee el problema de requerir una construcción robusta de sus tanques con el fin de soportar las altas presiones necesarias para la operación del cohete. Por su parte el uso de turbo-bombas para presurizar el combustible no requiere paredes de tanque tan gruesas, sólo lo suficiente para almacenar el fluido y soportar la pequeña presión que requiere la bomba para operar, pero su construcción es más compleja al igual que su operación ya que tiene varias piezas móviles, lo cual lo hace más propenso a la falla. El método de bomba sin pistones mantiene la sencillez de construcción del primer método, pero con tanques de almacenamiento menos robustos y menos pesados, además no posee partes móviles, ni complicados sistemas de transmisión de potencia.

Figura 1. Unidades fundamentales de un cohete de propulsor líquido.
 Figura 1a. Presión alimentada. Figura 1b. Suministro mecánico. Figura 1c.
 Bomba sin pistones.



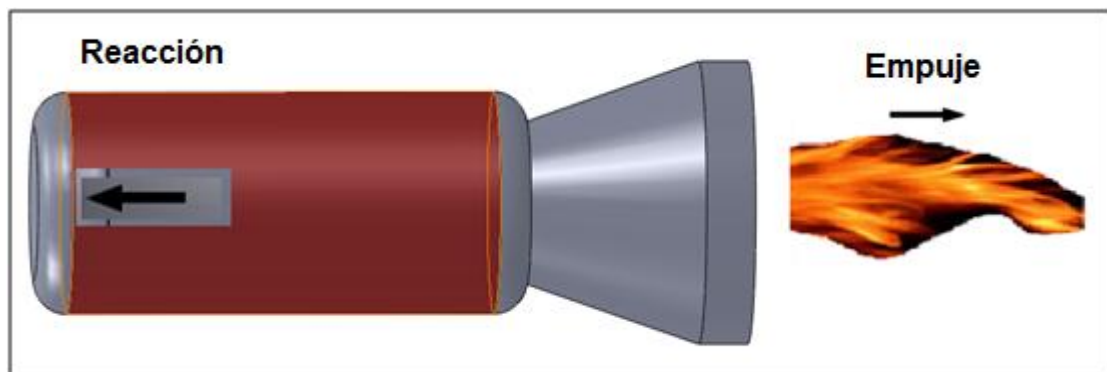
Fuente: Los autores

1.1 DINÁMICA DE PROPULSIÓN²

El término propulsión significa empuje, es decir, la reacción o respuesta a una fuerza aplicada a un objeto o cuerpo, según la tercera ley de newton al existir una fuerza, otra se genera igual y opuesta; en el caso de los cohetes las fuerzas opuestas se generan entre el casquete o cuerpo del cohete y un fluido en combustión.

De acuerdo a la segunda ley de newton “ley de conservación del movimiento”, para que un cuerpo se acelere se debe ejercer una fuerza sobre éste, para los cohetes la fuerza ejercida es conocida como empuje. El empuje es generado por la masa de gases calientes expulsados a una gran velocidad, sin una fuerza externa que iguale a la reacción que sufre el cohete, éste se acelera, (ver figura 2).

Figura 2. Empuje producido por la liberación de gases a alta temperatura.



Fuente: Los autores

² Hill, Philip G., and Peterson, Carl R. Mechanics and Thermodynamics of Propulsion. 2 ed. Editorial Prentice Hall. Addison-Wesley, 1965

El empuje de un motor de cohete se puede describir matemáticamente como:

$$E = m_f * v_g \quad [Ec. 1.1]$$

Donde

E = empuje

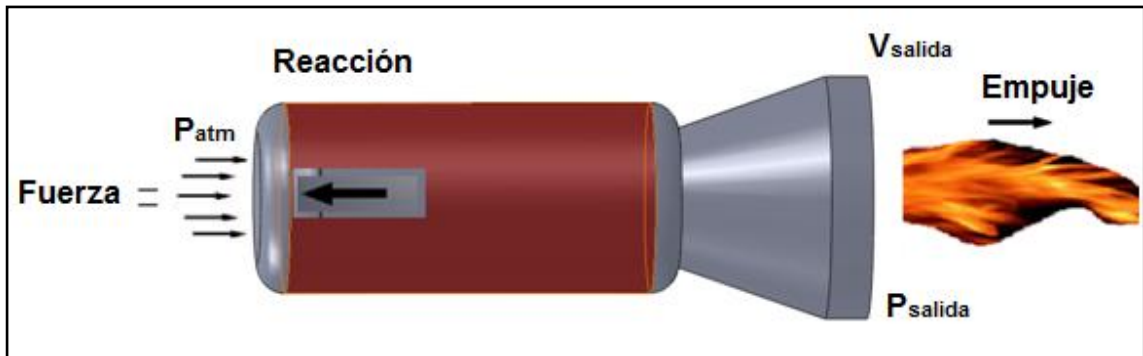
m_f = flujo másico de salida de los gases de combustión

v_g = velocidad de salida de los gases de combustión

Si el cohete va en dirección vertical el empuje debe ser mayor que el peso del mismo para poder lograr la elevación.

A continuación se muestran las diferentes fuerzas que se presentan en un cohete, (ver figura 3).

Figura 3. Fuerzas en un cohete.



Fuente: Los autores

Se deduce la ecuación que gobierna el comportamiento dinámico del cohete.

$$F = \int P dA = m_f * v_g + (P_{sal} - P_{atm}) A_{sal} \quad [Ec. 1.2]$$

Donde

F = fuerza

P = presión

A = área

P_{sal} = presión de salida

P_{atm} = presión atmosférica

A_{sal} = área de salida

Considerando la continuidad (conservación de la masa) la ecuación 1.2 se puede escribir de la siguiente forma:

$$F = \rho^* \times A^* \times v^* \times v_g + (P_{sal} - P_{atm})A_{sal} \quad [Ec. 1.3]$$

Donde

ρ^* = densidad

A^* = área de la garganta

v^* = velocidad

Los parámetros con estrella son valores críticos³.

Después de algunas modificaciones la ecuación 1.3 queda de la siguiente forma:

$$F = A^* \times P_o \times \sqrt{\frac{2k^2}{k-1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left(1 - \left(\frac{P_{emp}}{P_o}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)} + (P_{sal} - P_{atm})A_{sal} \quad [Ec. 1.4]$$

Donde

P_o = presión en la cámara de combustión.

³ Se aconseja remitirse a un texto especializado debido a que este tema en específico no hace parte del desarrollo de este libro.

k = relación de calores específicos

P_{emp} = presión de empuje

La ecuación 1.4 muestra que si el término de presión de empuje es cero, entonces el empuje es directamente proporcional al área de la garganta, A^* , y es casi directamente proporcional a la presión de cámara. Esto quiere decir que para un aumento del área de la garganta de la tobera se tendrá un aumento proporcional del impulso, claro está que el área de la garganta y la presión de la cámara están muy relacionados, por lo cual cualquier cambio en las dimensiones de la tobera genera todo un cambio en los parámetros de diseño, y cualquier aumento de presión aumenta el impulso (empuje), por esta razón se requiere evaluar constantemente la presión.

La presión en la cámara de combustión depende de la presión obtenida aguas arriba por el sistema de presurización. La variación de esta presión, determina la variación de la fuerza generada por el cohete (la cual se espera sea lo menos variable posible).

La figura 4 muestra la relación de empuje, F/F_{max} , contra la relación de presión (o expansión), donde F_{max} es el empuje que se puede obtener de una relación de expansión infinita (expandiéndose en el vacío, $P_e=0$). En el gráfico el empuje indicado, (F), excluye el término de presión de empuje. El empuje total producido está dado por:

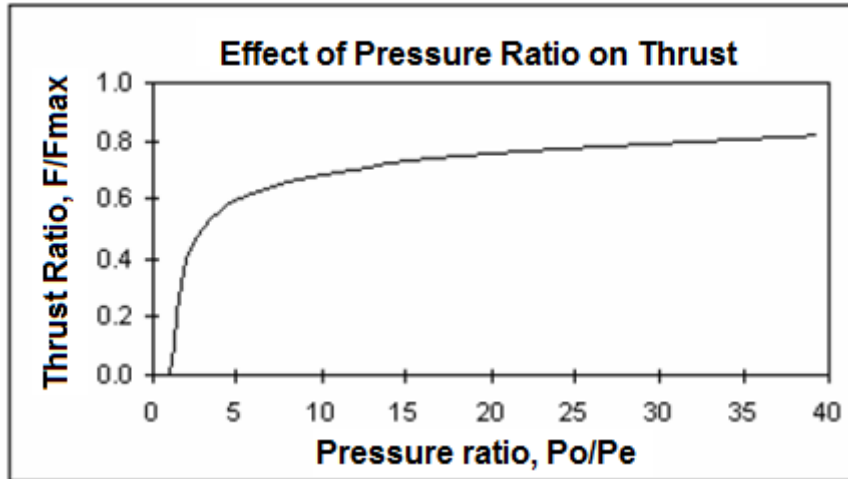
$$F_{total} = F + (P_{emp} - P_{atm})A_{emp} \quad [Ec. 1.5]$$

Donde:

F_{total} = empuje total

A_{emp} = área de empuje

Figura 4. Efecto de la relación de presión contra el empuje.



Fuente: Nakka, Richard. Teoría sobre Motores Cohete de Propelente Sólido. Disponible en internet < http://www.nakkarocketry.net/articles/teoria_de_los_motores_cohete.pdf >

Con el concepto de empuje se puede comprender el principio fundamental de la elevación de los cohetes, pero se necesita otro concepto que indique la salida total en términos de la capacidad de propulsión, ahí aparece el concepto de impulso total el cual incorpora el tiempo o duración del empuje.

$$I_t = \int_0^t F dt \quad [Ec. 1.6]$$

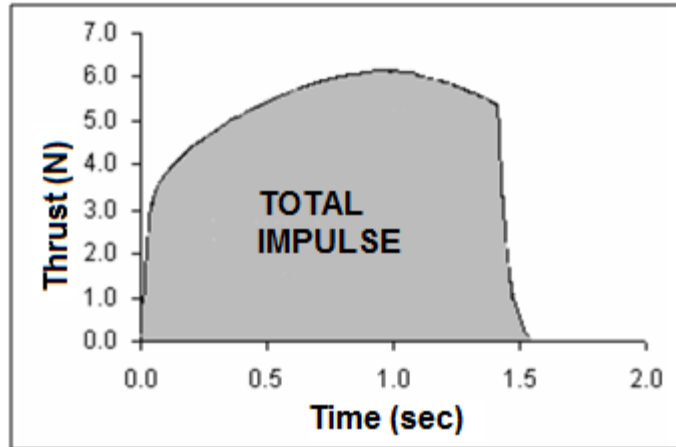
Donde

I_t = impulso total

t = tiempo

La integral representa el área bajo la curva empuje-tiempo, (ver figura 5).

Figura 5. Empuje vs tiempo.



Fuente: Nakka, Richard. Teoría sobre Motores Cohete de Propelente Sólido. Disponible en internet < http://www.nakkarocketry.net/articles/teoria_de_los_motores_cohete.pdf >

El impulso total sólo cuenta una historia de forma general sin decir que ocurrió en algún instante determinado. Por ejemplo un impulso total de 200 N-s puede hacer referencia tanto a un empuje de 100 N durante 2 segundos como a uno de 200 N en un segundo.

En el plano del diseño de cohetes existen parámetros que son fundamentales a la hora de buscar la eficiencia de los mismos, entre estos, el impulso específico es uno de los más importantes, muestra la cantidad de empuje generado por el cohete por unidad másica de combustible consumido; viene en unidades de segundo y está regido por la siguiente fórmula:

$$I_{es} = \frac{v_g}{g} \quad \text{"o"} \quad I_{es} = \frac{\text{empuje producido} * \text{tiempo de combustión}}{\text{masa total de combustible consumido}} \quad [\text{Ec. 1.7}]$$

Donde

I_{es} = Impulso específico

g = aceleración de la gravedad.

Se puede observar que el impulso específico es función de la velocidad de expulsión de los gases, la cual a su vez es función de la presión existente en la cámara de combustión. Al construir un cohete se busca que el I_{es} sea lo más grande posible, dado que la forma de aprovechar al máximo la masa de combustible y oxidante transportado. Para conseguir altos valores de I_{es} se deben tener altas temperaturas y presiones de combustión y a la vez densidades bajas de los productos de la combustión, esto hace que se consigan diferentes valores de I_{es} con diferentes combinaciones de combustible y oxidante.

El impulso específico entregado depende de:

- Flujo másico, que depende del tamaño del motor.
- Energía de combustión disponible del propelente
- Eficiencia de la tobera
- Condiciones de presión ambiental
- Pérdida de calor en el motor
- Pérdidas por flujo bifásico
- Eficiencia de la combustión

Por último, se define el concepto de velocidad característica C^* . Es una especie de propiedad o merito termodinámico del propelente y puede verse como un indicativo de la eficiencia de la combustión, el valor ideal de C^* está definido como:

$$C^* = \sqrt{\frac{\frac{R'}{MT_0}}{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}} \quad [Ec. 1.8]$$

Donde

R' = constante de los gases

M = número de Mach de los gases de combustión.

T_0 = temperatura inicial

El impulso específico está relacionado con C^* de la siguiente forma:

$$I_{es} = C^* \frac{C_f}{g} \quad [Ec. 1.9]$$

Donde

C_f = coeficiente de empuje (estima la eficiencia de la tobera).

Cada variable presente en el funcionamiento de un cohete, es afectada de forma diferente según el sistema de presurización aplicado (presión alimentada, turbo-bomba o bomba sin pistones), en la tabla 1 se enlista las ventajas y desventajas de cada uno. En esta tabla se muestra las notables ventajas que representa un sistema de presurización de bombas sin pistones, por ello se consideró como la mejor opción de investigación, por su simplicidad, funcionalidad, además la alta aplicabilidad de este sistema de presurización lo hace una excelente opción en el campo de la propulsión de cohetes.

Tabla 1. Tabla comparativa sistemas de presurización

	PRESIÓN ALIMENTADA	TURBO-BOMBA	BOMBA SIN PISTONES
Tanques de combustible	Paredes robustas y tanques pesados	Tanques de almacenamiento livianos	Tanques de almacenamiento livianos
Partes móviles	A parte de las válvulas de control no posee piezas móviles	Gran cantidad de elementos móviles que aumentan la posibilidad de falla	A parte de las válvulas de control no posee piezas móviles
Complejidad de construcción	Sencillos procesos de manufactura	Alta tecnología de construcción y de difícil adquisición	Su complejidad de construcción es menor que los anteriores sistemas.
Carga útil	Se ve limitada por el peso propio de los tanques	Es alta, debido a sus características propulsivas	Su capacidad es intermedia entre los sistemas comunes de presurización
cavitación	No se presenta	Alto riesgo, y muy común	No se presenta.
Válvulas de control	Sistema sencillo de válvulas	Sistema sencillo de válvulas	Se requiere de un sistema complejo de control
Costos	Altos debido a la construcción de los tanques	Altos debido a la complejidad del sistema de turbo-bomba	Bajo costo en relación a los anteriores sistemas
Adquisición de tecnología	Difícil adquisición	Difícil adquisición	Difícil adquisición

Fuente: Los autores

2. FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO⁴

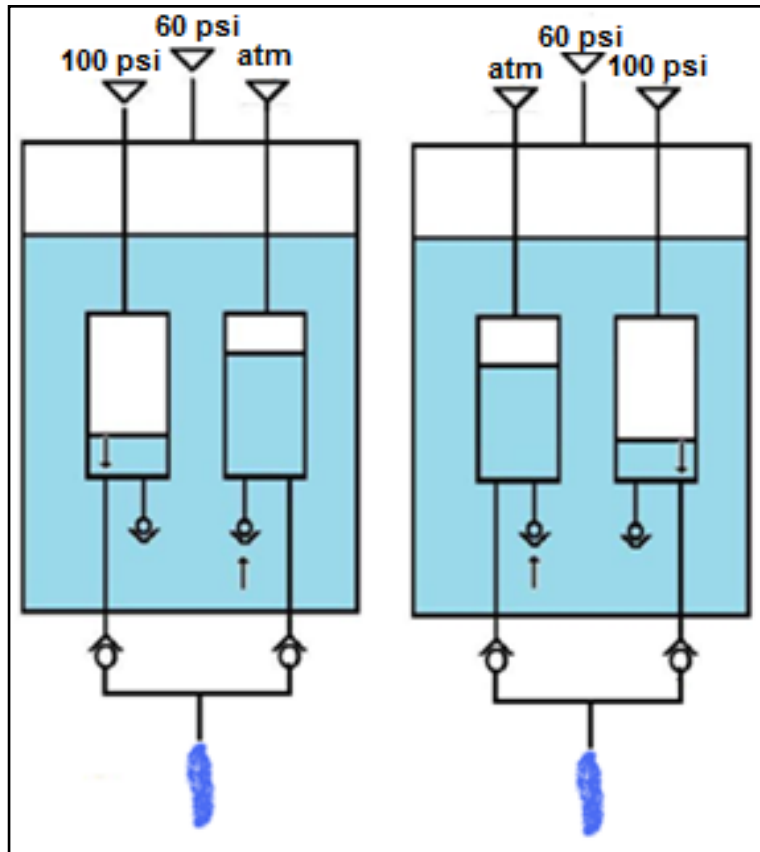
El funcionamiento del prototipo se puede visualizar como el de una bomba reciprocante, solo que en este caso, el aire comprimido hace las veces de pistón. El flujo es empujado y “absorbido” dentro de las cámaras de bombeo cuando la presión aplicada sobre estas cambia de un valor dado a presión de venteo (en este caso presión atmosférica). En otras palabras el principio de operación se puede considerar como un juego de presiones alternantes.

Para explicar el principio de funcionamiento se usarán presiones de ejemplo: 100 psi para la presión aplicada en las cámaras de bombeo, 60 psi en el tanque y presión atmosférica como presión de venteo. En la Figura 6 la presión aplicada a las cámaras de bombeo en contra de la presión aplicada sobre el tanque genera la diferencia de presión necesaria para que exista un flujo de fluido dentro de estas, a su vez válvulas anti-retorno ubicadas en las líneas de carga y descarga controlan la dirección del flujo de agua.

Por su parte el cambio de presión aplicado sobre las cámaras de bombeo es controlado por dos válvulas direccionales. La Figura 7 muestra el esquema del funcionamiento de las mismas. El color rojo representa la dirección de flujo de aire hacia la cámara de bombeo (es cuando ocurre la descarga en la cámara de bombeo), el color azul representa el venteo del sistema (es cuando ocurre el llenado en la cámara de bombeo).

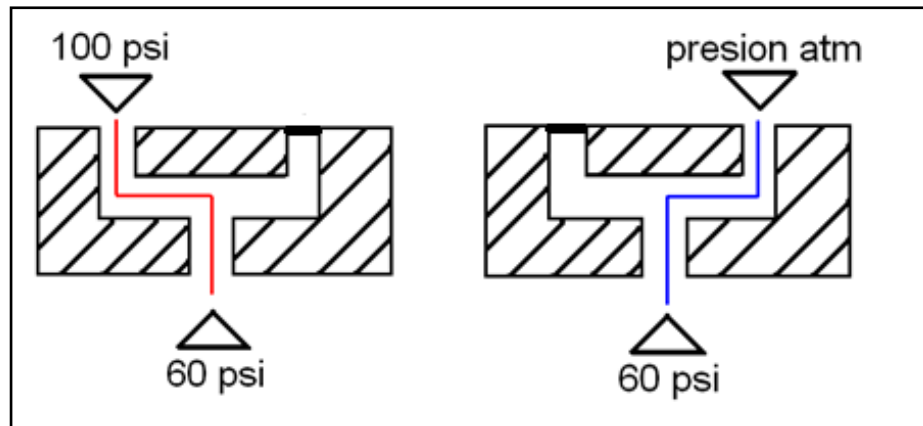
⁴ **HARRINGTON, Steve.** “*Pistonless Dual Chamber Rocket Fuel Pump*”. [citado en 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit 20-23 July 2003, Huntsville Alabama]. Portable Document Format. Disponible desde: http://www.flometrics.com/rockets/rocket_pump/rocketpump.htm

Figura 6. Esquema de funcionamiento del prototipo.



Fuente: Los autores

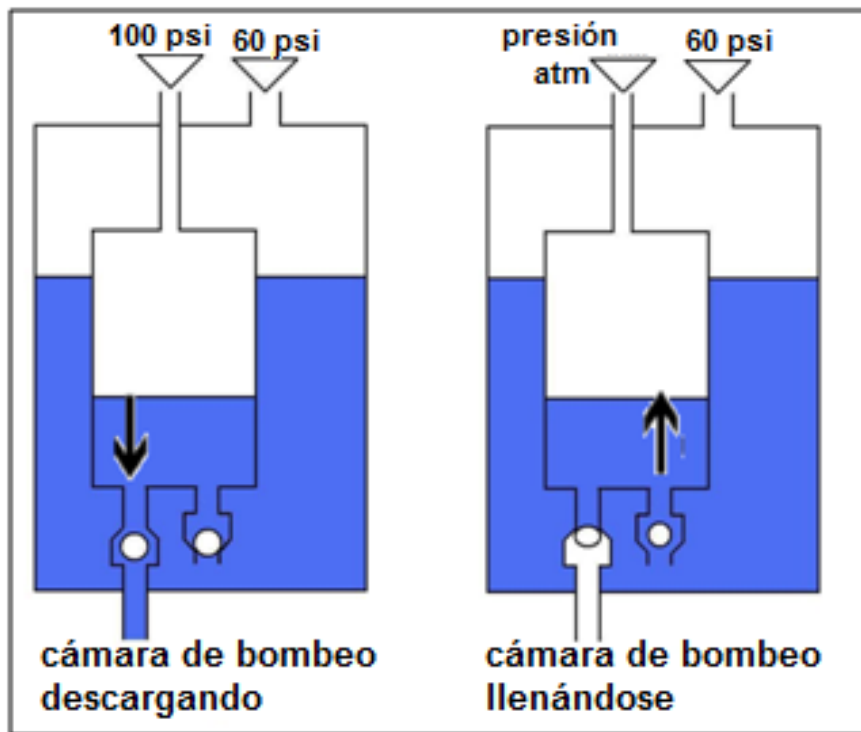
Figura 7. Esquema Válvula direccional.



Fuente: Los autores

La Figura 8 muestra el funcionamiento dentro de una de las cámaras de bombeo del prototipo. Se puede apreciar que cuando la presión de 100 psi es aplicada a la cámara de bombeo se inicia el proceso de descarga, en este instante se abre la válvula cheque de la izquierda, mientras que la de la derecha se cierra por la diferencia de presión; cuando se ventea la cámara de bombeo (presión atmosférica) la válvula cheque de la izquierda se cierra y la de la derecha se abre permitiendo la entrada de agua, y de esta forma ocurre el llenado o carga.

Figura 8. Complemento de la figura 7. Llenado y descarga de una de las cámaras de bombeo.

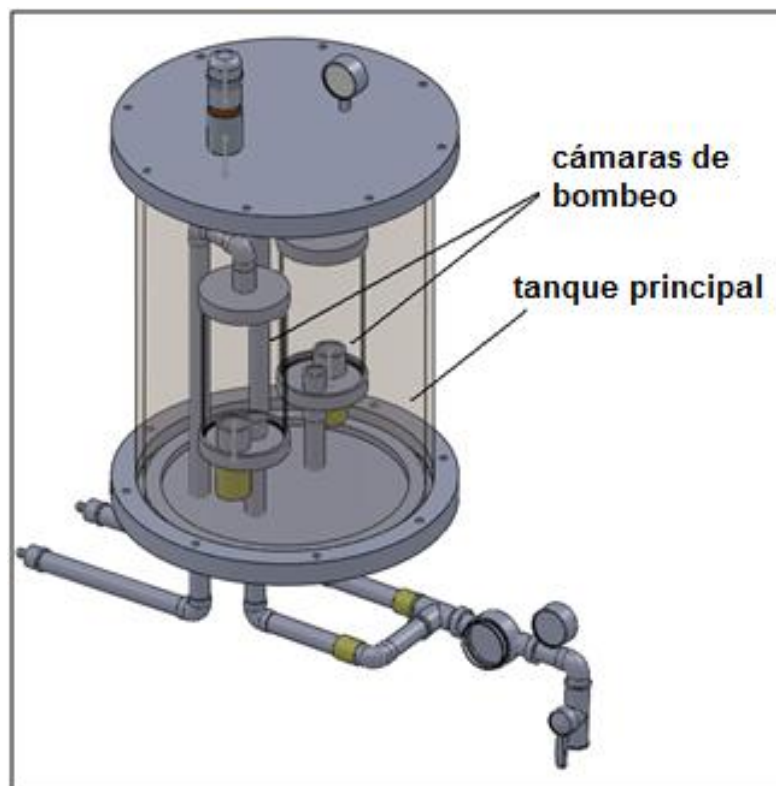


Fuente: Los autores

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

El prototipo que se puede apreciar en la Figura 9, está compuesto por un sistema neumático entrelazado con un sistema hidráulico, los cuales comparten dos cilindros denominados cámaras de bombeo y se conectan en un cilindro mayor denominado tanque de almacenamiento.

Figura 9. Ensamble prototipo.

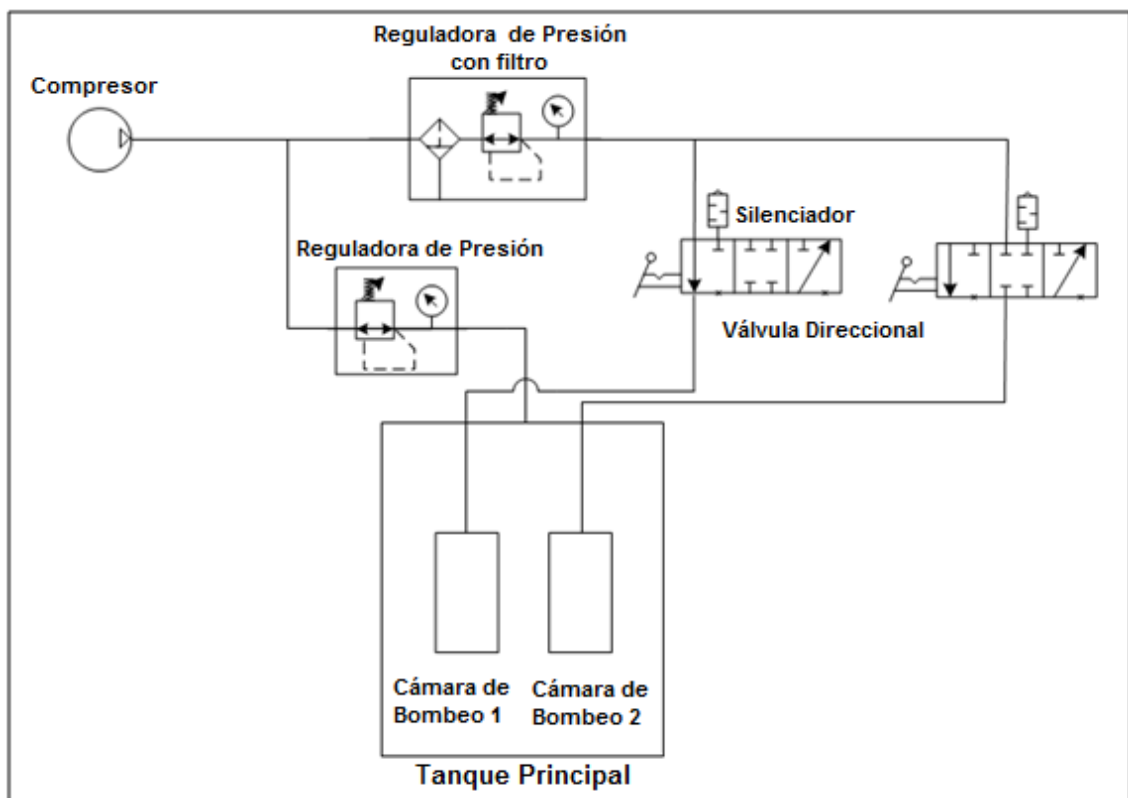


Fuente: Los autores

Además lleva incorporado algunos dispositivos de medición, entre los cuales se cuenta con un caudalímetro y dos manómetros. En la Figura 10 se puede

apreciar el banco de control neumático, el cual está conformado por dos válvulas direccionales de tres posiciones y cuatro vías con centro cerrado de mando manual con un puerto sellado; y dos válvulas reguladoras de presión una de ellas con filtro. Toda la unidad de control está soportada sobre un banco construido en perfil L (ángulo).

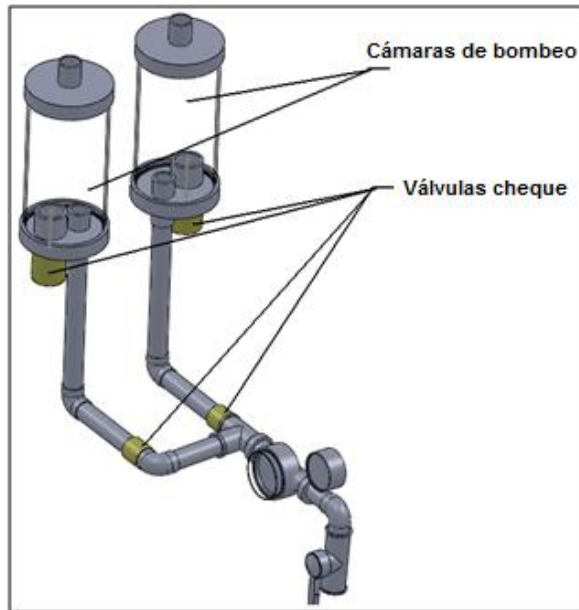
Figura 10. Esquema neumático.



Fuente: Los autores

En la Figura 11 se ilustra un circuito hidráulico compuesto principalmente por las cámaras de bombeo, cuatro válvulas cheque: dos de media pulgada para la descarga y dos de una pulgada para el llenado, puesto que se necesita que el llenado sea más rápido que la descarga, un caudalímetro y una llave de paso.

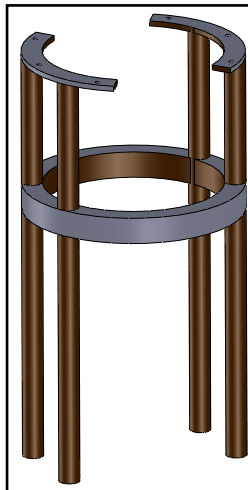
Figura 11. Sistema hidráulico.



Fuente: Los autores

Todo el prototipo está apoyado sobre una estructura que permite apreciar el funcionamiento sin entorpecer las labores de medición, (*ver figura 12*).

Figura 12. Estructura soporte.



Fuente: Los autores

Las cámaras de bombeo y el tanque están hechos en material transparente para poder apreciar a simple vista el comportamiento físico del proceso de bombeo. El tanque de almacenamiento está asegurado a la estructura de soporte con 8 tensores que aseguran a su vez las bridas del tanque, (*ver figura 13*).

Figura 13. Detalle unión: estructura de soporte-tanque-bridas.



Fuente: Los autores

3. DIMENSIONAMIENTO⁵

3.1 TANQUE DE ALMACENAMIENTO

El tanque de almacenamiento se construyó en acrílico, porque es un material de relativa facilidad de manipulación, y permite al igual que el policarbonato, observar lo que ocurre internamente dentro del prototipo.

Para la selección de las dimensiones del tanque se tuvo en cuenta el espacio necesario para adecuar las dos cámaras de bombeo con los aditamentos que sirven como acoples, y que a su vez tenga el volumen necesario para que el prototipo realice alrededor de 20 ciclos con las cámaras de bombeo llenas; las cámaras de bombeo albergan litro y medio de fluido, pero no se debe permitir que se llenen hasta el tope; por ello se consideró el volumen por ciclo de cada cámara igual a un litro, en las dos cámaras el volumen total por ciclo es de dos litros y para 20 ciclos el tanque debe almacenar alrededor de 40 litros libres de los 3 litros que almacenan las cámaras de bombeo.

Entonces para un diámetro ya seleccionado de 34 cm la longitud sería:

$$lt = \frac{4 * vt}{\pi * dit^2} = \frac{4 * (40000cm^3 + 3000 cm^3)}{\pi * (34cm)^2} = 47,36 cm \quad [Ec. 3.1]$$

Donde:

lt = longitud del tanque de almacenamiento

vt = volumen total del tanque de almacenamiento

dit = diámetro interno del tanque de almacenamiento

⁵ Fuente: León E, Juan M. Diseño y cálculo de recipientes a presión. 2001 [online]. Disponible en internet < <http://www.scribd.com/doc/17247549/disen-y-calculo-de-recipientes-a-presion>>

Esta longitud solo cumple hasta el momento el requisito de volumen mínimo necesario. Teniendo en cuenta el espacio ocupado por la tubería, válvulas cheque y espacio para maniobrar internamente en caso de cualquier desajuste; se determinó una longitud que sea mayor a la obtenida con la formula de volumen.

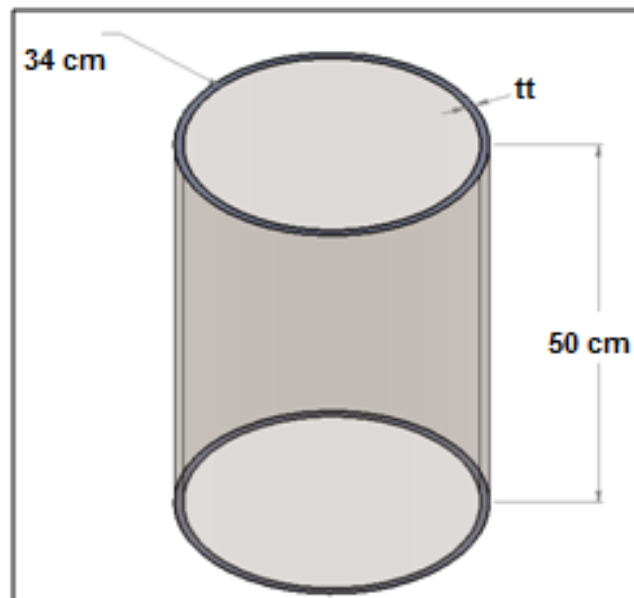
En ese orden de ideas, las dimensiones con las que se construyó el tanque son las siguientes, (ver figura 14):

$$dit = 34 \text{ cm}$$

$$lt = 50 \text{ cm}$$

$$tt = \text{por calcular}$$

Figura 14. Dimensiones Tanque Principal



Fuente: Los autores

Donde:

dit = diámetro interno del tanque

lt = longitud del tanque

t = espesor de la pared del tanque

v = volumen del tanque

3.1.1 Espesor Pared del Tanque

Para el cálculo del espesor de la pared del tanque se usa la siguiente ecuación:

$$t = \frac{P * R}{2SE - 0,6P} \quad [Ec. 3.2]$$

Donde:

t = espesor de la pared del cilindro

P = presión máxima de operación

R = radio interno del cilindro

S = esfuerzo máximo de fluencia para el acrílico

E = eficiencia de la soldadura (se consideró como 0,55)

Para el cálculo de la presión se tiene en cuenta la presión hidrostática ejercida por el fluido.

$$P_h = \rho * g * h = 1000 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 0,5 m = 4,905 kpa \quad [Ec. 3.3]$$

Donde

P_h = presión hidrostática

ρ = densidad

h = altura

g = gravedad

$$P = P_o + \rho h + 200 \text{ kpa} = 618,605 \text{ kpa} \quad [\text{Ec. 3.4}]$$

Donde

P_o = presión aplicada al tanque 60 psi = 413,7 kpa (para este caso será la máx. que reciba el tanque).

Los 200 kpa se usan como una medida de seguridad⁶

La tabla 2 muestra la resistencia mecánica del acrílico entre 8000 psi (55000 Kpa) y 11000 psi (76000 Kpa) pero para los cálculos solo se usará el valor de 65000 Kpa

$$t = \frac{618,605 \text{ kpa} * 17 \text{ cm}}{2 * 65000 \text{ kpa} * 0,55 - 0,6 * 618,605 \text{ kpa}} = 0,1478 \text{ cm}$$

Debido a las condiciones de transporte a los cuales será sometido el prototipo el valor de t se tomó como

$$t = 1 \text{ cm}$$

⁶ Fuente: León E, Juan M. Diseño y cálculo de recipientes a presión. 2001 [online]. Disponible en internet < <http://www.scribd.com/doc/17247549/disen-y-calculo-de-recipientes-a-presion> >

Tabla 2. Propiedades del Acrílico.

INFORMACIÓN TÉCNICA SOBRE LAMINAS ACRÍLICAS CRISTACRYL	
<p>El acrílico Cristacryl es un plástico termoformable</p> <p>TEMPERATURA de moldeo: 150°C 180°C (sobre superficie de temperatura uniforme).</p> <p>Para trabajo continuo estable hasta 86 °C</p>	
GRAVEDAD ESPECIFICA	1,19
INDICE DE REFRACCIÓN	(color cristal 00) 1,49
TRANSMISION DE LUZ:	(color cristal 00) pasarela 92% Total 93%
Módulo de Elasticidad (Tensión)	de 350 a 450 10³ psi
RESISTENCIA A LA TENSIÓN:	de 8000 a 11000 psi
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	de 12000 a 17000 psi
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN:	De 11000 a 19000 psi
RESISTENCIA AL CORTE:	9000 psi
FLAMIBILIDAD (Burning rate):	33 mm/min lenta combustión
ABSORCIÓN DE AGUA (wt gain) 24 horas:	0,2 a 0,4%
COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA:	50 a 90 10⁻⁶ in/in/°C
<p>El acrílico se ofrece en cristal y gama de colores</p> <p>Es excelente su resistencia a la mayoría de productos químicos incluyendo soluciones de Alcalis y Ácidos inorgánicos como: Amoniac, Acido Sulfúrico (dep. de la concentración) y los hidrocarburos alifáticos como Exano, Octano, Naftas.</p>	

Fuente: Ficha Técnica CRISTACRYL [online]. Disponible en internet: <http://www.cristacryl.com/Laminasacrilicas.html>

3.2 CÁMARAS DE BOMBEO

Las cámaras de bombeo se construyeron en policarbonato de cristal, se buscó que albergaran alrededor de un litro y medio (1_{1/2}) y que su tamaño sea grande para apreciar el funcionamiento del prototipo.

Por lo tanto las dimensiones de las cámaras de bombeo quedaron de la siguiente manera:

dic = 10 cm

$$l = \frac{4 * vc}{\pi * dic^2} = \frac{4 * 1500 \text{ cm}^3}{\pi * 10^2} = 19,09 \text{ cm (se aproximó a 20cm)} \quad [Ec. 3.5]$$

Donde:

l = longitud de las cámaras de bombeo

vc = volumen de las cámaras de bombeo

dic = diámetro interno de las cámaras de bombeo

Las propiedades mecánicas del policarbonato de cristal se enuncian en la tabla 3.

3.2.1 Espesor de Pared de las Cámaras de Bombeo

Para hallar su espesor se utiliza la Fórmula 3.2 pero se desprecia la presión hidrostática y la eficiencia de soldadura se considera igual a 1, dado que el cilindro está construido por extrusión.

$$t = \frac{889,478 \text{ kpa} * 5 \text{ cm}}{2 * 65000 \text{ kpa} * 1 - 0,6 * 889,478 \text{ kpa}} = 0,034 \text{ cm}$$

Debido a las condiciones de transporte a los cuales será sometido el prototipo el valor de t se tomó como

$$t = 0,3 \text{ cm}$$

Tabla 3. Propiedades Mecánicas Policarbonato.

PROPIEDADES	NORMA	UNIDADES	VALOR
FÍSICAS	DIN 53479	g/cm ³	1,2
Densidad			
Transmisión de luz (transparente 3 mm)	DIN 5036	%	90
Índice de refracción	DIN 53491		1,585
MECÁNICAS			
Resistencia elástica con tracción	DIN 53455	N/mm ²	>60
Resistencia a la ruptura con tracción	DIN 53455	N/mm ²	>70
Módulo de elasticidad	DIN 53457	N/mm ²	2300
Resistencia al impacto	DIN 53453	kJ/m ²	>30
TÉRMICAS			
Coeficiente de expansión lineal		1/K	65 x 10 ⁻⁶
Expansión térmica		mm/m°C	0,065
Conductividad térmica	DIN 52612	W/mK	0,21
Punto de ablandamiento		°C	145
Temperatura máxima de uso continuo		°C	100

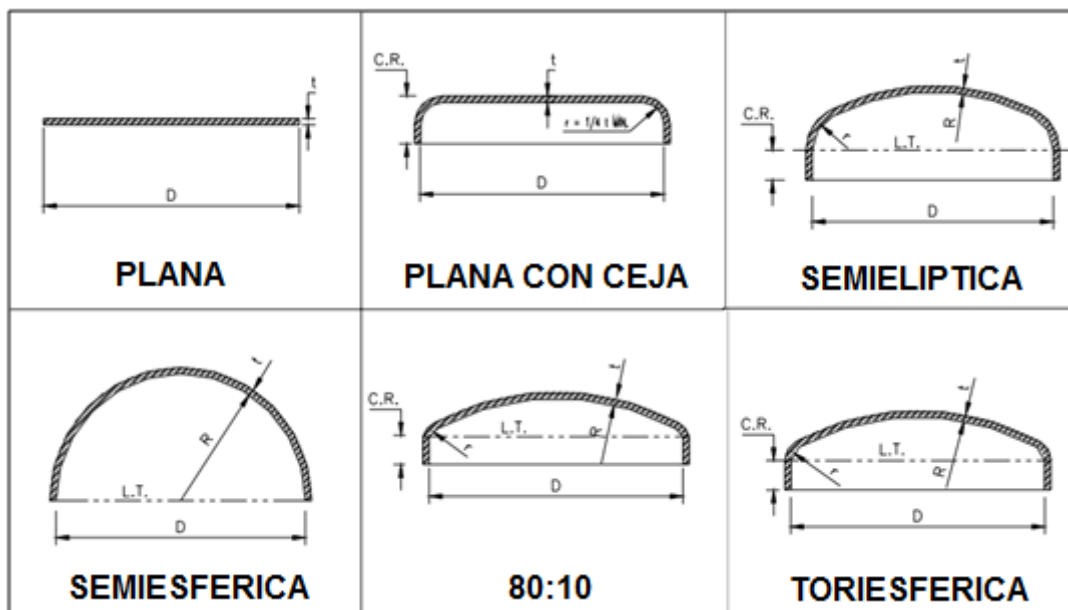
Fuente: Ficha Técnica FEMOGLAS [online]. Disponible en internet: http://www.femoglas.com/lin_policarbonato.php.

3.3 ESPESOR TAPAS PARA RECIPIENTES A PRESIÓN

Existe una gran cantidad de tipos de tapas para cerrar recipientes a presión; tapa plana, tapa plana con pestaña, únicamente abombadas, abombadas con ceja invertida, toriesféricas, semielípticas, semiesféricas, tapas 80-10, tapas cónicas, toricónicas, entre otras, (ver figura 15).

Para el diseño de las tapas del tanque y de las cámaras de bombeo se usarán los cálculos para tapa plana con pestaña, por ser la más económica y fácil construcción; por lo general se usa solo para aplicaciones donde la presión a manejar es la presión atmosférica y en algunos casos es usado en recipientes bajo presiones no muy altas.

Figura 15. Diseño y calculo de recipientes a presión



Fuente: León E, Juan M. Diseño y cálculo de recipientes a presión. 2001 [online]. Disponible en internet < <http://www.scribd.com/doc/17247549/disenio-y-calculo-de-recipientes-a-presion> >

Para el cálculo del espesor de esta tapa se uso la siguiente fórmula:

$$t = d \sqrt{\frac{C' * P}{S * E}} \quad [Ec. 3.6]$$

Donde:

t = espesor de la tapa

C' = constante adimensional que depende de la forma de la unión: 0,13 para tapa plana

P = presión de diseño

S = esfuerzo máximo permisible

E = eficiencia de soldadura (para las tapas se consideró 0,8)

d = diámetro interno de la tapa

3.3.1 Tapas cámaras de bombeo

$$t = 10 \text{ cm} * \sqrt{\frac{0,13 * 689,48 \text{ kpa}}{65000 * 0,8}} = 0,40 \text{ cm}$$

3.3.2 Tapas Tanque de Almacenamiento

Solo se usa para el cálculo la presión de operación sumada a la presión hidrostática.

$$t = 34 \text{ cm} * \sqrt{\frac{0,13 * 418,605 \text{ kpa}}{65000 * 0,8}} = 1,09 \text{ cm}$$

La tabla 4 muestra un resumen de la geometría hasta aquí calculada o seleccionada.

Tabla 4. Resumen de los valores de construcción del prototipo

	DIÁMETRO	LONGITUD	ESPESOR	VOLUMEN
CÁMARAS DE BOMBEO	10 cm	20 cm	0,3 cm	1,5 litros
TANQUE	34 cm	50 cm	1 cm	90 ,7 litros

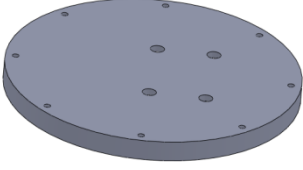
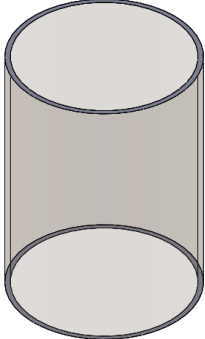
Fuente: Los autores

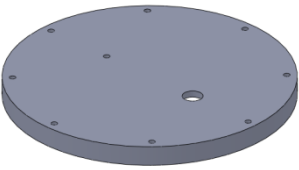
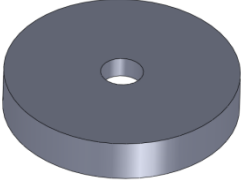
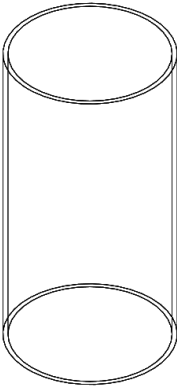
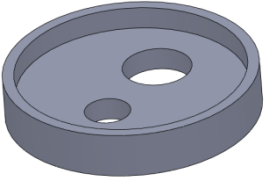
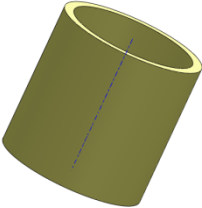
4. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

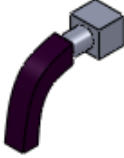
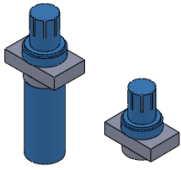
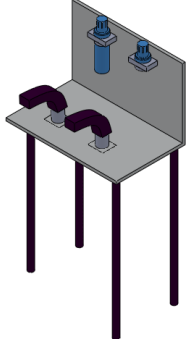
Después de diseñar y dibujar cada una de las piezas, se procedió a hacer un ensamble detallado en el software Solid Works, con lo cual se encontraron varias limitantes que afectaban no solo la construcción si no el buen funcionamiento del prototipo. Seguido a ello se procedió a hacer las debidas correcciones, y de nuevo se hizo la simulación del ensamble. Con las correcciones y modificaciones se usó el mismo proceso (paso a paso) que se simuló con el programa CAD para unir las piezas reales del prototipo.

En la tabla 5 se especifican las partes del prototipo, dividiéndose de la siguiente manera: Tanque principal, cámaras de bombeo, línea hidráulica, línea neumática, banco de control e instrumentos de medición.

Tabla 5. Partes del prototipo

Tanque Principal	
Componente	Figura
Brida superior	
Tanque	

<p>Brida inferior</p>	
<p>Cámaras de Bombeo</p>	
<p>Componente</p>	<p>Figura</p>
<p>Tapa superior</p>	
<p>Cilindro menor</p>	
<p>Tapa inferior</p>	
<p>Línea Hidráulica</p>	
<p>Válvulas anti-retorno</p>	
<p>Válvula de compuerta y Tubería pvc de 1" y 1/2"</p>	

Línea Neumática	
Compresor , manguera de ¼"	
Válvulas direccionales 4/3	
Reductor de presión	
Banco de Control	
	
Instrumentos de Medición	
Caudalímetro y Manómetros	

Fuente: Los autores

4.1 CONSTRUCCIÓN DE LAS CÁMARAS DE BOMBEO

Las tapas para las cámaras de bombeo se fijaron al cilindro menor con resina epoxica y se selló cualquier posible fuga con sellante especial para acrílico, luego se fijaron las tuberías de la línea hidráulica y neumática con adaptadores

machos y hembra de pvc entre los cuales se usaron orings de caucho para generar un sello positivo, (ver figura 16).

Figura 16. Construcción de las cámaras de bombeo



Fuente: Los autores

4.2 MONTAJE DE LA CÁMARA DE BOMBEO A LA BRIDA INFERIOR

Tanto la línea hidráulica como neumática sirvieron de sostén y fijación para las cámaras de bombeo a la brida inferior del tanque, la unión entre la tubería y la brida se hizo con adaptador hembra, oring y adaptador macho a través de

huecos pasantes y en la interface se usó sellante epóxico para las fugas, (ver figura 17).

Figura 17. Montaje de la cámara de bombeo a la brida inferior

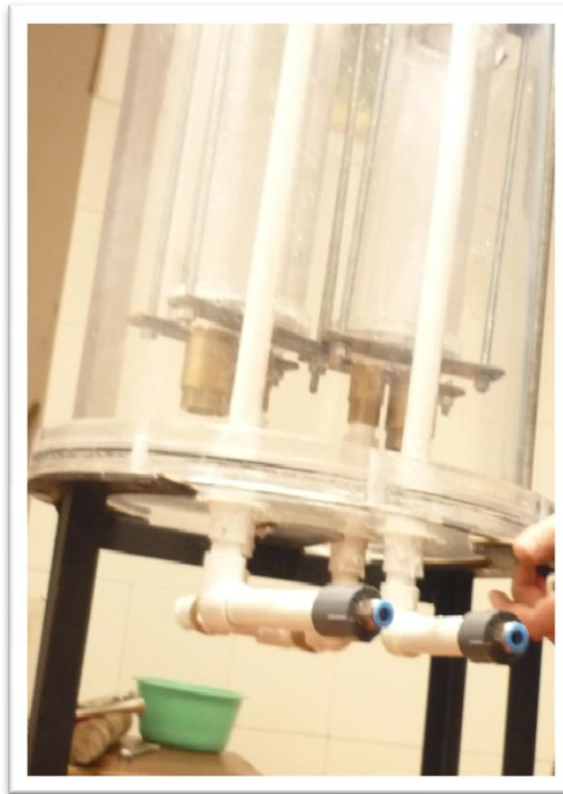


Fuente: Los autores

4.3 ESTRUCTURA SOPORTE.

Para su construcción se tuvo en cuenta la ubicación de las líneas hidráulicas y neumáticas, además se construyó de forma que los espárragos de la bridas se aseguren con la placa superior de la estructura y permitan un fácil desmantelamiento, (ver figura 18).

Figura 18. Soporte



Fuente: Los autores

4.4 MONTAJE BRIDA SUPERIOR Y ANCLAJE

El tanque fue fijado a las bridas inferior y superior por presión, (*ver figura 19*), y por medio de los espárragos que conectan el tanque a la estructura soporte, (*ver figura 20*).

Figura 19. Montaje brida superior



Fuente: Los autores

Figura 20. Anclaje

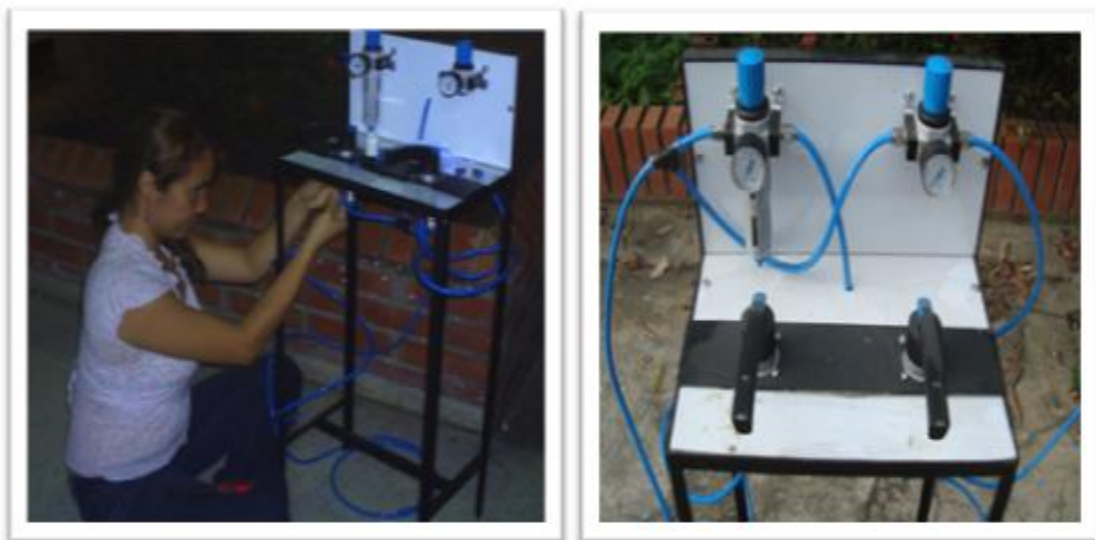


Fuente: Los autores

4.5 CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE CONTROL.

Se construyó en ángulo de 1" y madera revestida con fórmica. Se le adecuaron las válvulas direccionales y las válvulas reguladoras de presión de forma que fueran visibles y además que fueran de fácil manipulación, (ver figura 21).

Figura 21. Construcción del banco de control



Fuente: Los autores

4.6 ADECUACIÓN INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN (CAUDALÍMETRO Y MANÓMETRO)

El sistema cuenta con tres manómetros, dos en las válvulas reguladoras para asegurar la presión de operación y uno en el tanque principal para monitorear

la presión en éste. Para medición del flujo másico se uso un caudalímetro marca BURKER modelo 8035 con transductor (de efecto hall), (ver figura 22).

Figura 22. Caudalímetro y Manómetro



Fuente: Los autores

4.7 ENSAMBLE TERMINADO.

En la Figura 23 se aprecia en conjunto el prototipo con el tablero de control ya terminado.

Figura 23. Ensamble terminado



Fuente: Los autores

5. PRUEBAS Y ANÁLISIS

Para efectuar las pruebas se preparó el prototipo en general, para las cuales se realizaron las debidas conexiones del sistema neumático con el hidráulico como se muestra en la Figura 24, luego se verificaron la calibración de los instrumentos de medición y se hizo un chequeo visual de las posibles fugas de líquido.

Figura 24. Conexión sistema neumático con el hidráulico



Fuente: Los autores

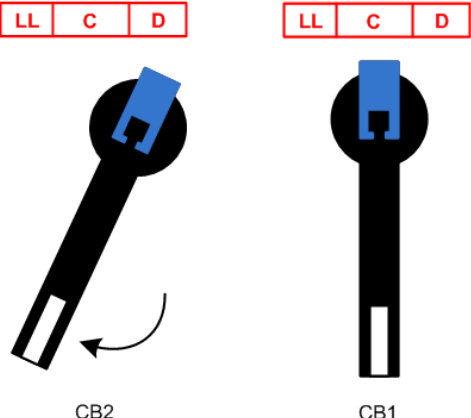
Se adecuaron tres videocámaras para registrar todas las pruebas, distribuidas de la siguiente manera: la primera en el caudalímetro y manómetro de la línea hidráulica, la segunda enfocando el tanque principal para visualizar el comportamiento de las cámaras de bombeo y la tercera en el banco de control, el fin de ésta distribución de cámaras fue recopilar la mayor cantidad de información en tiempo real.

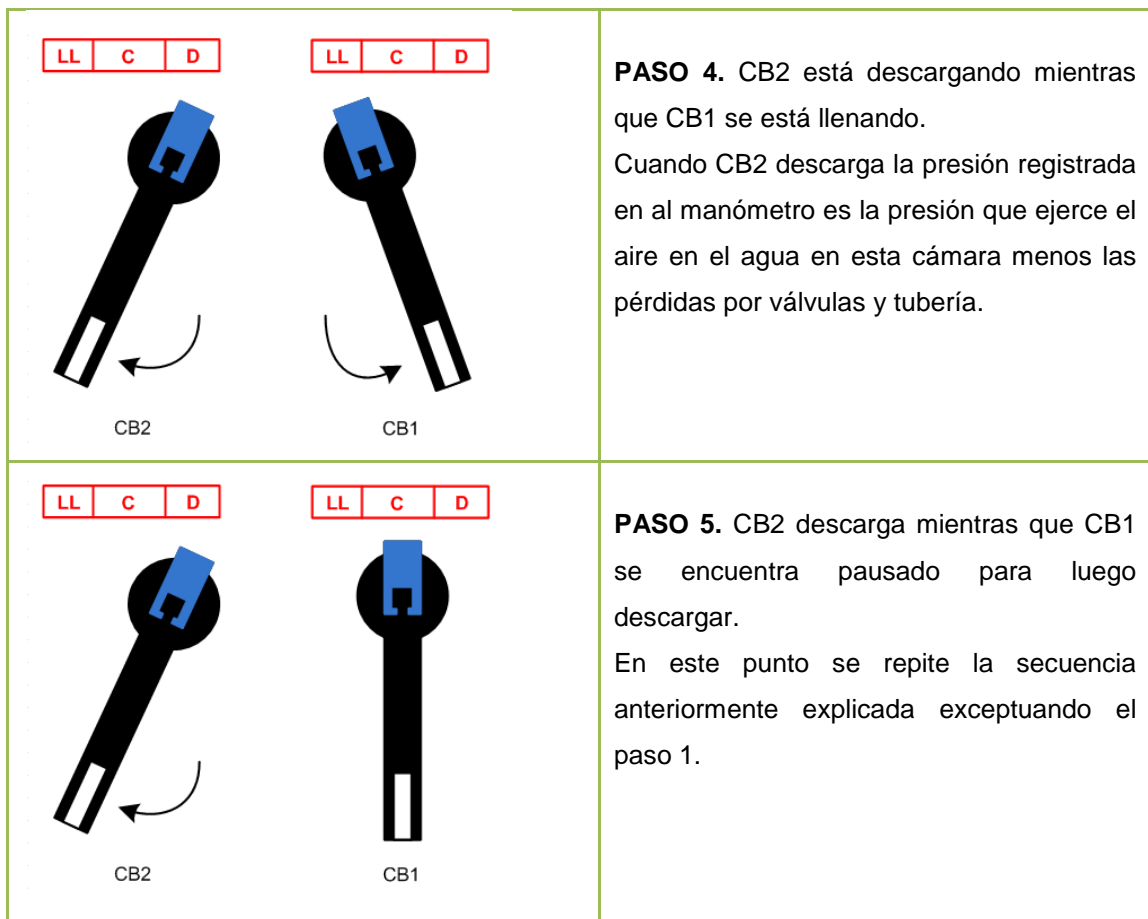
En todas las pruebas, el tanque principal se mantuvo a una presión de 10 psi y la presión dirigida a las cámaras de bombeo se varió para cada prueba, usando presiones de 15 psi, 20 psi, 25 psi, 30 psi y 35 psi, para ello se realizaron tres pruebas a cada presión. Y para el análisis de caudal, se usó la válvula de compuerta instalada en la línea de descarga variando la estrangulación del fluido.

5.1 ANÁLISIS DEL MANEJO DE CONTROLES

Para lograr entender el funcionamiento del prototipo desde un punto de vista básico, el control del mismo se hizo de forma manual con dos válvulas direccionales de cuatro vías y tres posiciones con centro cerrado y se programó la siguiente secuencia de funcionamiento:

Tabla 6. Secuencia y análisis del manejo de controles

CONTROL	PASO
 <p style="text-align: center;">CB2 CB1</p>	<p>PASO 1. Las cámaras se llenan mientras se estabiliza el sistema.</p> <p>Al iniciar la prueba las válvulas direccionales se encuentran en posición central (es decir en centro cerrado), de esta manera las cámaras se empiezan a llenar hasta que se equilibra el sistema.</p> <p>Este paso solo ocurre al iniciar cada prueba.</p>
 <p style="text-align: center;">CB2 CB1</p>	<p>PASO 2. CB1 está descargando mientras que CB2 está pausada.</p> <p>En este instante la presión registrada en el manómetro es la presión que ejerce el aire en el agua en esta cámara menos las pérdidas por válvulas y tubería.</p>
 <p style="text-align: center;">CB2 CB1</p>	<p>PASO 3. CB2 descarga mientras que CB1 se encuentra pausado para luego llenarse. Inmediatamente CB1 termine de descargar debe pasar a la posición central mientras que en el <i>mismo instante</i> CB2 debe empezar a descargar. Si no se hace de esta manera se produce pulsaciones en el chorro.</p>



Fuente: Los autores

5.2 PRUEBA No 1.

Presión tanque: 10 psi

Presión cámaras de bombeo: 15 psi

Estrangulamiento de la válvula: una vuelta

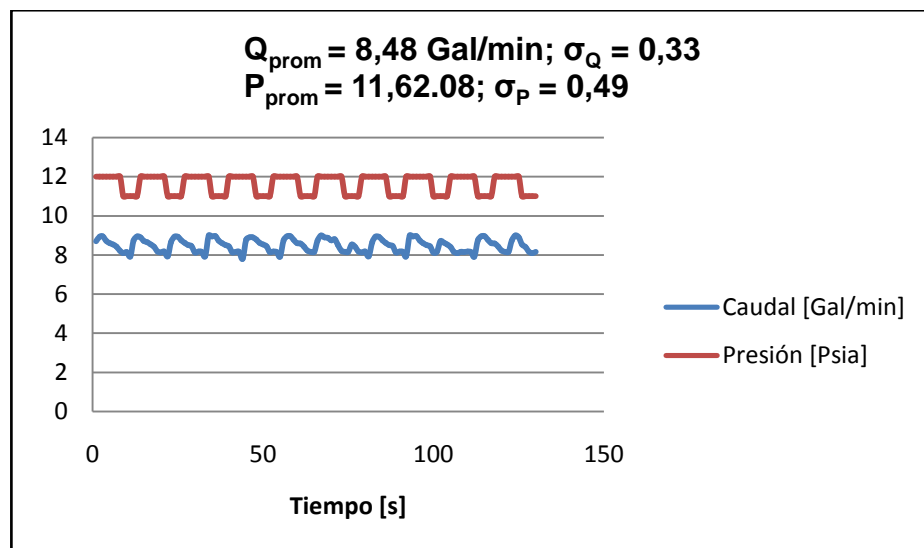
Figura 25. Prueba No 1.



Fuente: Los autores

Al finalizar todas las pruebas se procedió a tabular los datos obtenidos por la primera video cámara con intervalos de un segundo. Dichos valores se graficaron como lo muestra la Figura 26.

Figura 26. Gráfica Prueba No 1

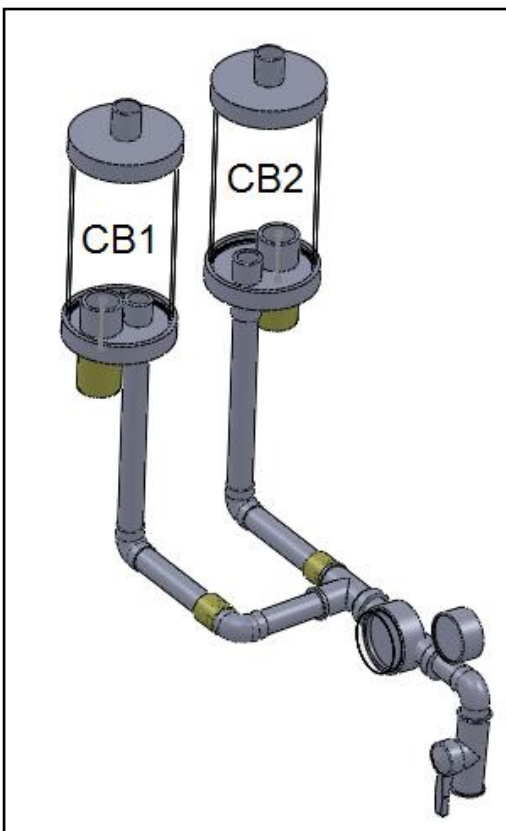


Fuente: Los autores

5.2.1. Análisis de la Prueba No 1.

Para explicar los fenómenos físicos que se hacen presentes en la bomba sin pistones les daremos denominación a las cámaras de bombeo. La cámara de bombeo de la izquierda será CB1 y la de la derecha será CB2, (ver figura 27).

Figura 27. Denominación de las cámaras de Bombeo



Fuente: Los autores

Para analizar el comportamiento de las gráficas se debe tener en cuenta que:

Q_{prom} = Datos de caudal promedio

σ_Q = Desviación estándar de los datos del caudal

P_{prom} = Datos de presión promedio

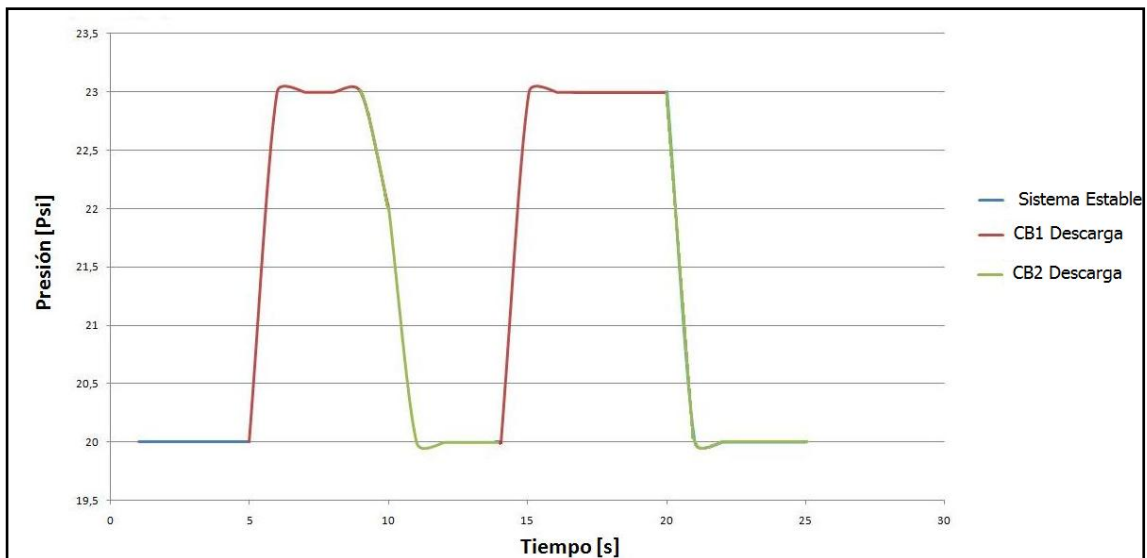
σ_P = Desviación estándar de los datos de la presión

5.2.1.1 Análisis de Presurización de las líneas de descarga

Tanto el caudal como la presión son susceptibles a las pérdidas de presión propias de cada línea de descarga de las cámaras de bombeo, hasta el punto que pueden afectar el buen funcionamiento del prototipo. Ya que para cada línea hay un valor de perdidas diferente, esto hará que la presión de descarga se vea escalada cada vez que hay un cambio de cámara de bombeo y lo mismo ocurrirá con el caudal.

La Figura 28 muestra el comportamiento regular de la presión de descarga en todas las pruebas; se observa que cuando CB1 está descargando la presión marcada por el manómetro es mayor que cuando la CB2 lo hace, esto es debido a que los anti-retornos colocados a la salida de las cámaras no tienen las mismas pérdidas e influyen directamente en el caudal que entrega el prototipo haciéndolo menor o mayor.

Figura 28. Gráfica de análisis de descarga de cada CB

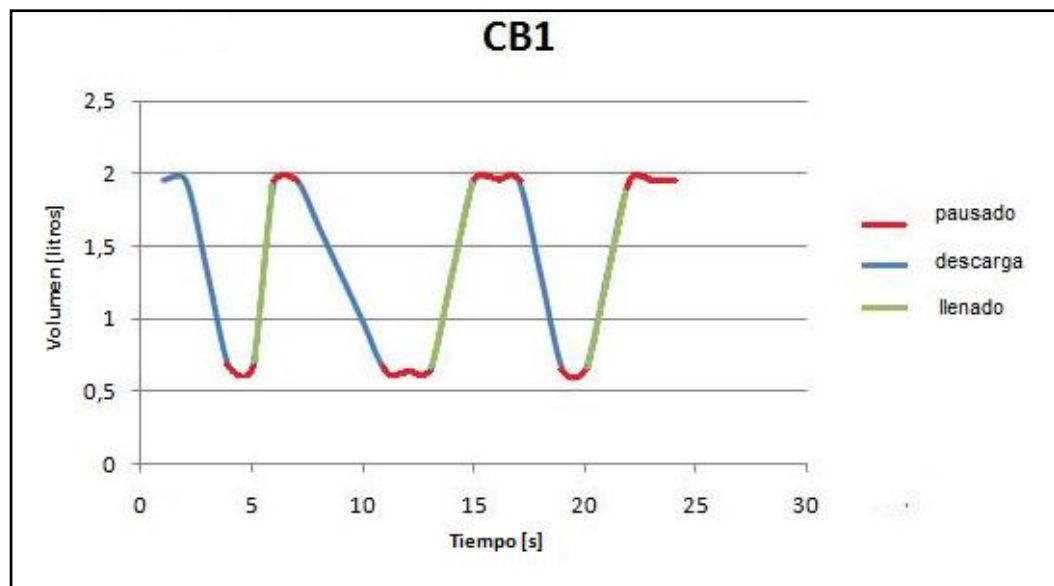


Fuente: Los autores

5.2.1.2 Análisis de llenado y descarga de cada CB

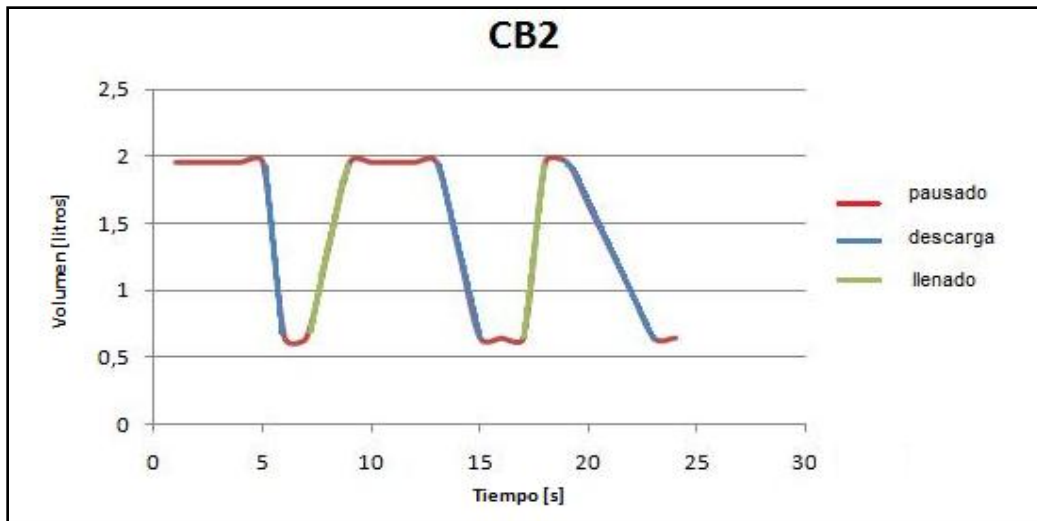
Observamos que el color azul representa cuando la cámara se encuentra descargando y las líneas de color verde muestra cuando la cámara se está cargando, (ver figura 29). El comportamiento se presenta de forma cíclica de la forma siguiente: En el instante inicial la cámara está llena, empieza a descargar, cuando termina de descargar, CB1 se pausa como lo indica el color rojo de la línea para que simultáneamente empiece a descargar CB2, inmediatamente después CB1 se llena en un tiempo menor que la descarga como lo muestra la pendiente de la línea, esto es debido a que el área de entrada de la cámara es mayor que el área de salida, lo cual es indispensable en el funcionamiento ya que se garantiza siempre fluido en la cámara antes que la otra termine de descargar. Cuando CB2 termine de descargar, CB1 empieza nuevamente su ciclo.

Figura 29. Gráfica de Volumen Vs tiempo (llenado y descarga) de CB1



Fuente: Los autores

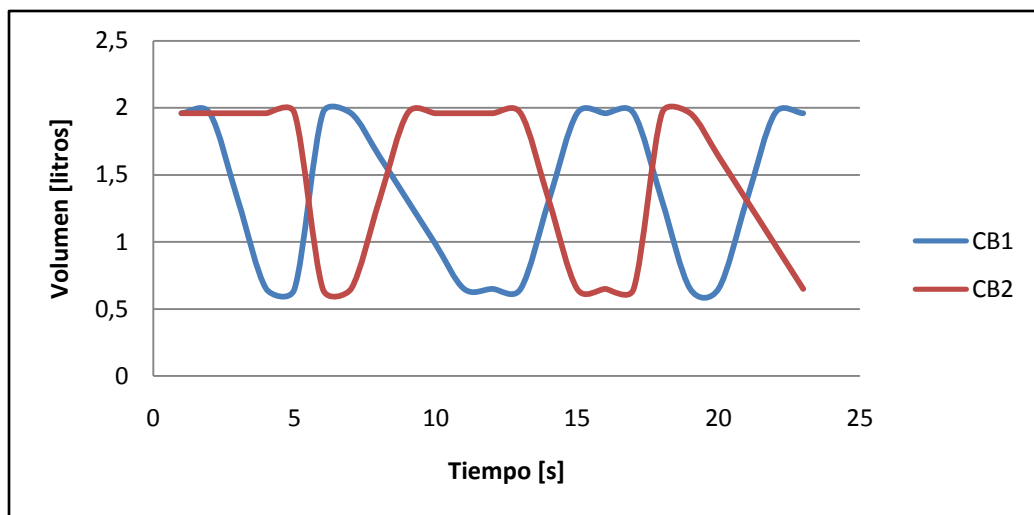
Figura 30. Gráfica de Volumen Vs tiempo (llenado y descarga) de CB2



Fuente: Los autores

Como muestra la Figura 31 el funcionamiento de las cámaras se realiza alternativamente con el fin de mantener siempre las líneas de descarga con flujo.

Figura 31. Gráfica de comparación del funcionamiento de las cámaras de bombeo



Fuente: Los autores

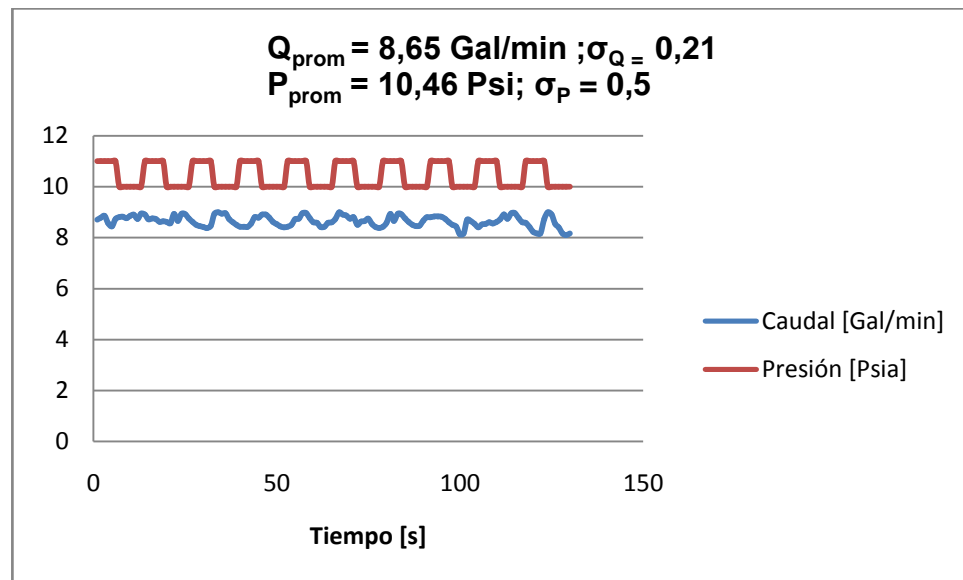
5.3 PRUEBA No 2.

Presión tanque: 10 psi

Presión cámaras de bombeo: 15 psi

Estrangulamiento de la válvula: dos vueltas

Figura 32. Gráfica Prueba No 2



Fuente: Los autores

5.3.1. Análisis de la Prueba No 2.

A diferencia de la prueba 1, la Figura 32 muestra un comportamiento del caudal con menos pulsaciones, aun así se sigue conservando las diferencias entre cada tiempo de descarga de las cámaras. Ya que el control es manual en su totalidad, con esta prueba observamos que la manipulación del prototipo se hace más sencilla mientras más obstruido está el paso de caudal por la válvula de compuerta.

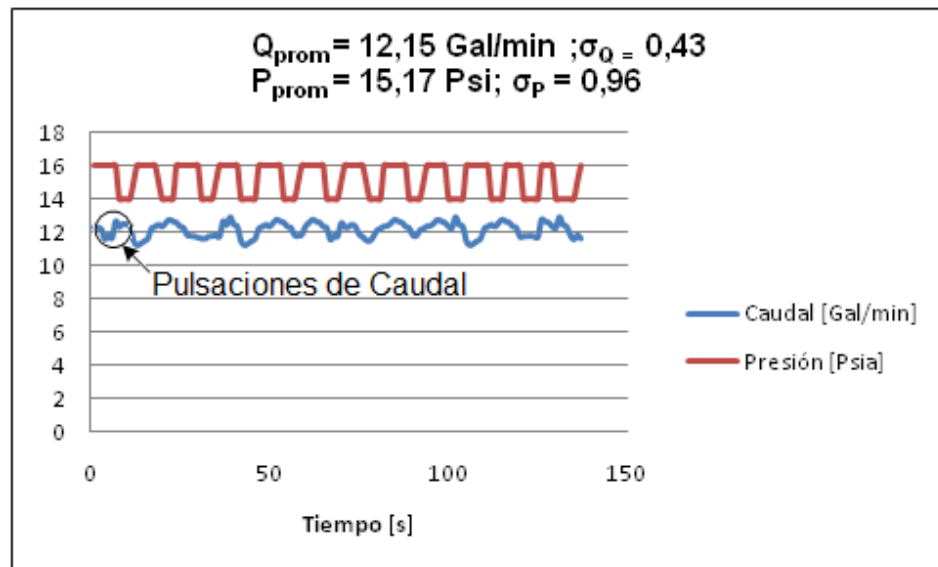
5.4 PRUEBA No 3.

Presión tanque: 10 psi

Presión cámaras de bombeo: 20 psi

Estrangulamiento de la válvula: una vuelta

Figura 33. Gráfica Prueba No 3



Fuente: Los autores

5.4.1. Análisis de la Prueba No 3.

El comportamiento señalado en la Figura 33 se presenta al iniciar todas las pruebas, esto ocurre porque se deben igualar los niveles de agua de las cámaras de bombeo para dar comienzo a la prueba, por ello estos datos no se tuvieron en cuenta para el análisis de resultados

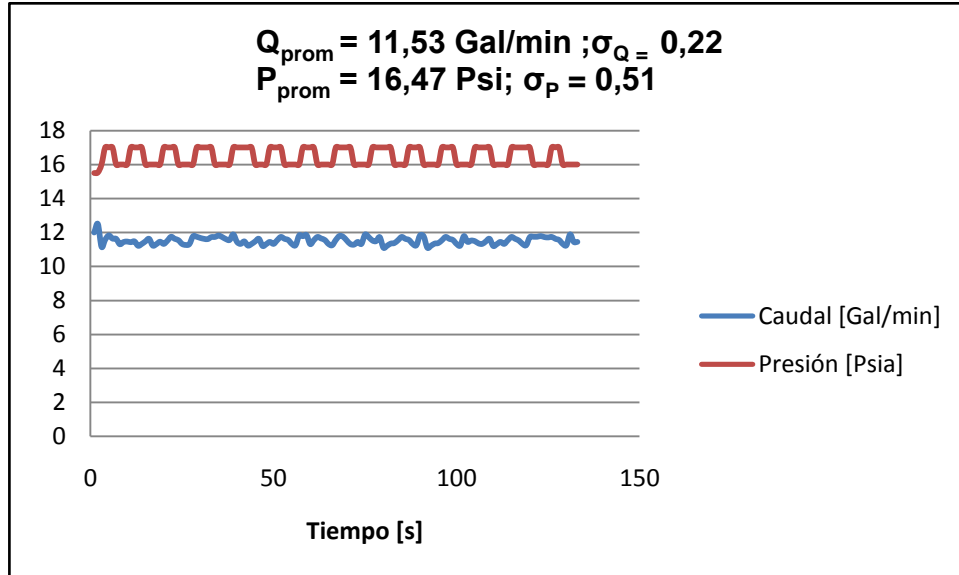
5.5 PRUEBA No 4.

Presión tanque: 10 psi

Presión cámaras de bombeo: 20 psi

Estrangulamiento de la válvula: dos vueltas

Figura 34. Gráfica Prueba No 4



Fuente: Los autores

5.5.1. Análisis de Prueba No 4.

La σ_Q y la σ_P como se muestra en la Figura 34 disminuyó, en comparación de los resultados obtenidos en la prueba 3, debido a que entre menor sea la abertura de la válvula de compuerta como en la prueba 2, más sencillo es el manejo del banco de control, reflejándose en un caudal menos pulsante. Se visualiza la importancia de un control preciso de los tiempos de operación de cada cámara de bombeo.

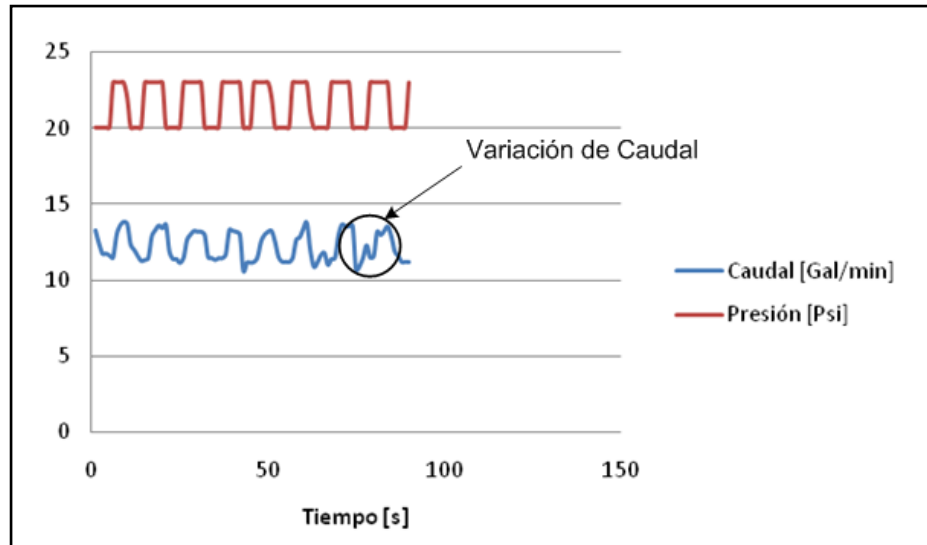
5.6 PRUEBA No 5.

Presión tanque: 10 psi

Presión cámaras de bombeo: 25 psi

Estrangulamiento de la válvula: una vuelta

Figura 35. Gráfica Prueba No 5



Fuente: Los autores

5.6.1 Análisis de Prueba No 5.

Al final de los ciclos se visualiza un comportamiento errático como se muestra en la figura 35, éste comportamiento se presenta en todas las gráficas, dado que el nivel del agua contenido en el tanque principal no es suficiente para la realización de las pruebas, provocando dichos resultados. Es por ello que los últimos datos no se consideraron relevantes.

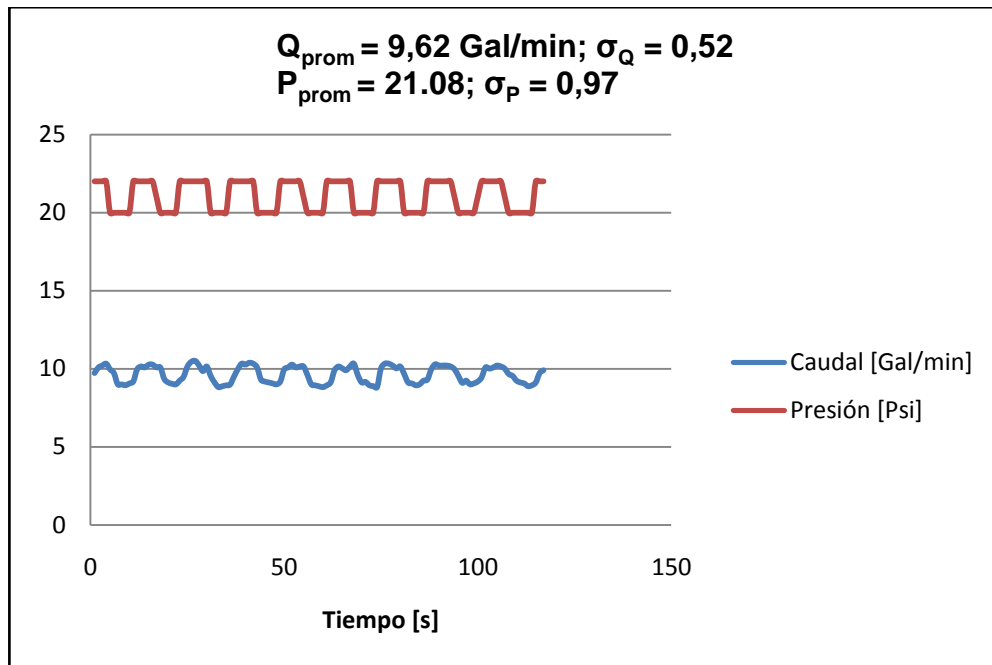
5.7 PRUEBA No 6.

Presión tanque: 10 psi

Presión cámaras de bombeo: 25 psi

Estrangulamiento de la válvula: dos vueltas

Figura 36. Gráfica Prueba No 6



Fuente: Los autores

5.7.1. Análisis de Prueba No 6.

A diferencia de la prueba 5 el valor del caudal promedio se redujo a 9,62 Gal/min, debido a la reducción de la abertura de la válvula de compuerta. Al presentarse este hecho se puede observar que el flujo tiende a ser más estable.

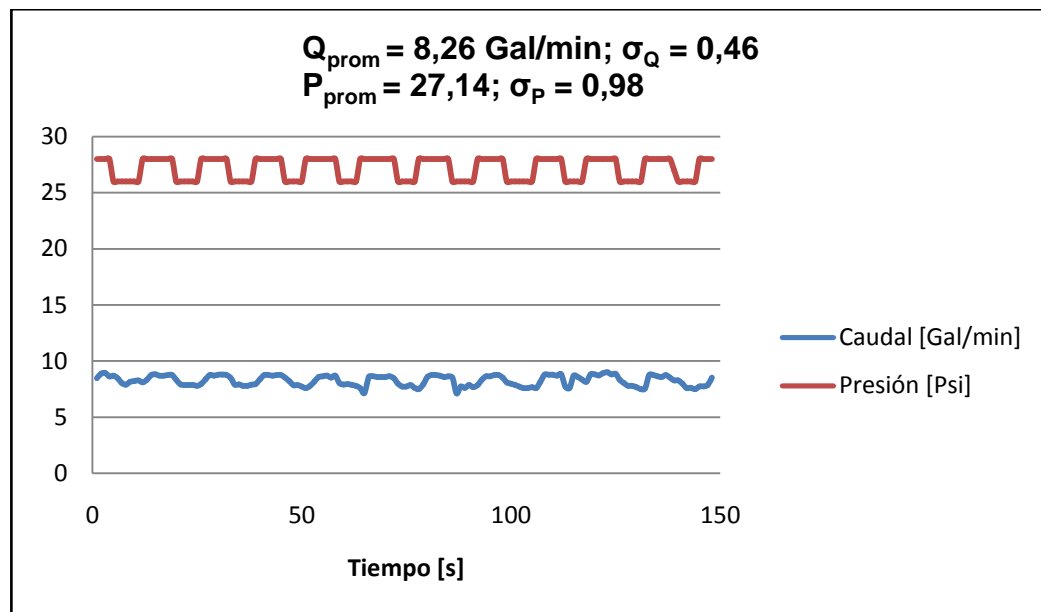
5.8 PRUEBA No 7

Presión tanque: 10 psi

Presión cámaras de bombeo: 30 psi

Estrangulamiento de la válvula: una vuelta

Figura 37. Gráfica Prueba No 7



Fuente: Los autores

5.8.1. Análisis de Prueba No 7.

A diferencia de la prueba 6, el caudal fue menos pulsante a pesar del mayor delta de presión, y el caudal fue menor debido a la mayor estrangulación de la válvula.

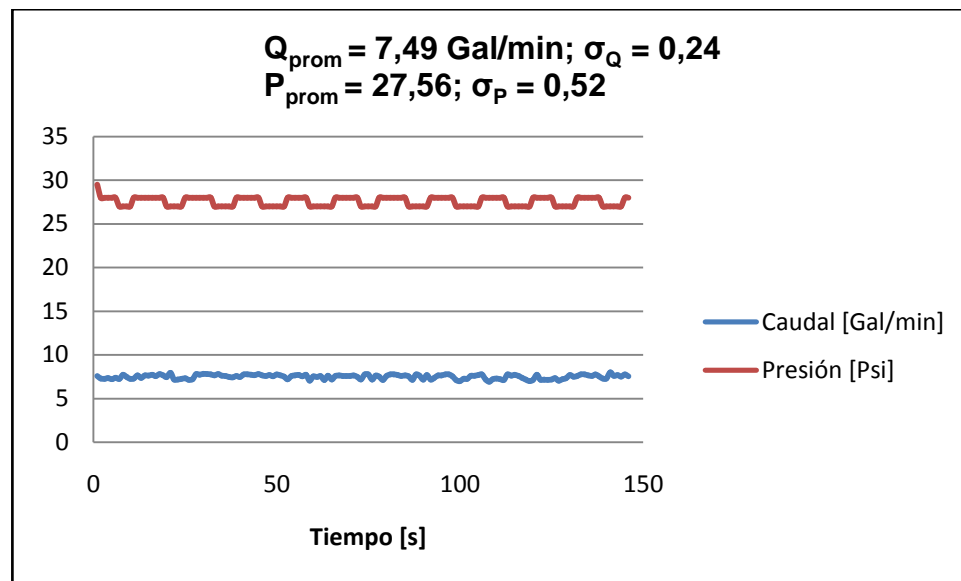
5.9 PRUEBA No 8

Presión tanque: 10 psi

Presión cámaras de bombeo: 30 psi

Estrangulamiento de la válvula: dos vueltas

Figura 38. Gráfica Prueba No 8



Fuente: Los autores

5.9.1. Análisis de Prueba No 8.

Al regular el caudal y tener agilidad en el manejo de los controles, se obtiene un flujo másico casi constante como se observa en la Figura 40.

5.10 PRUEBA No 9

Presión tanque: 10 psi

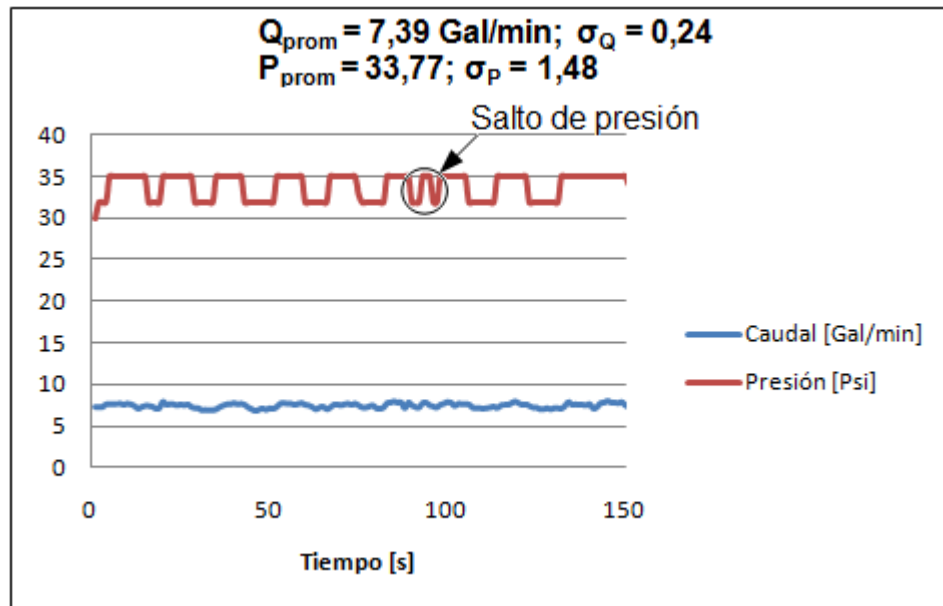
Presión cámaras de bombeo: 35 psi

Por la complejidad del manejo de los controles y notorios cambios en el comportamiento del caudal para estas condiciones, se decidió realizar 4 pruebas variando la abertura de la válvula de compuerta.

5.10.1 Prueba No 9a

Estrangulamiento de la válvula: dos vueltas y media

Figura 39. Gráfica Prueba No 9a



Fuente: Los autores

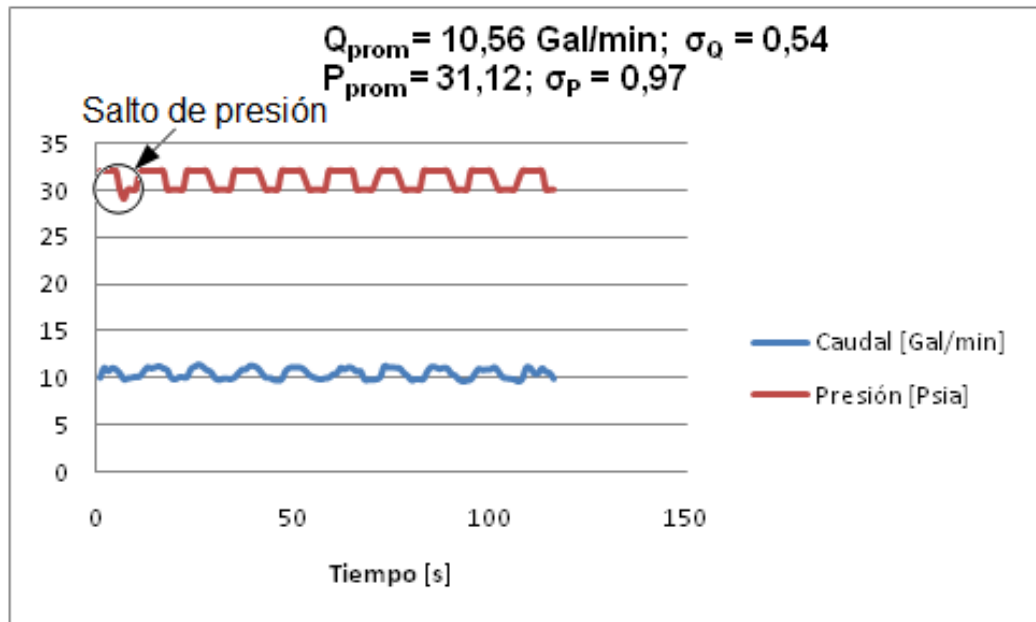
5.10.1.1 Análisis de Prueba 9a.

Se observó en esta prueba un caudal casi constante, esto debido a que al trabajar con dicha abertura, permite que la manipulación del banco de control sea más sencilla, a pesar de tener un delta de presión más alto que las pruebas anteriores. En la Figura 39 se muestra un pico de presión provocado por la manipulación de los controles.

5.10.2 Prueba 9b.

Estrangulamiento de la válvula: dos vueltas

Figura 40. Gráfica Prueba No 9b



Fuente: Los autores

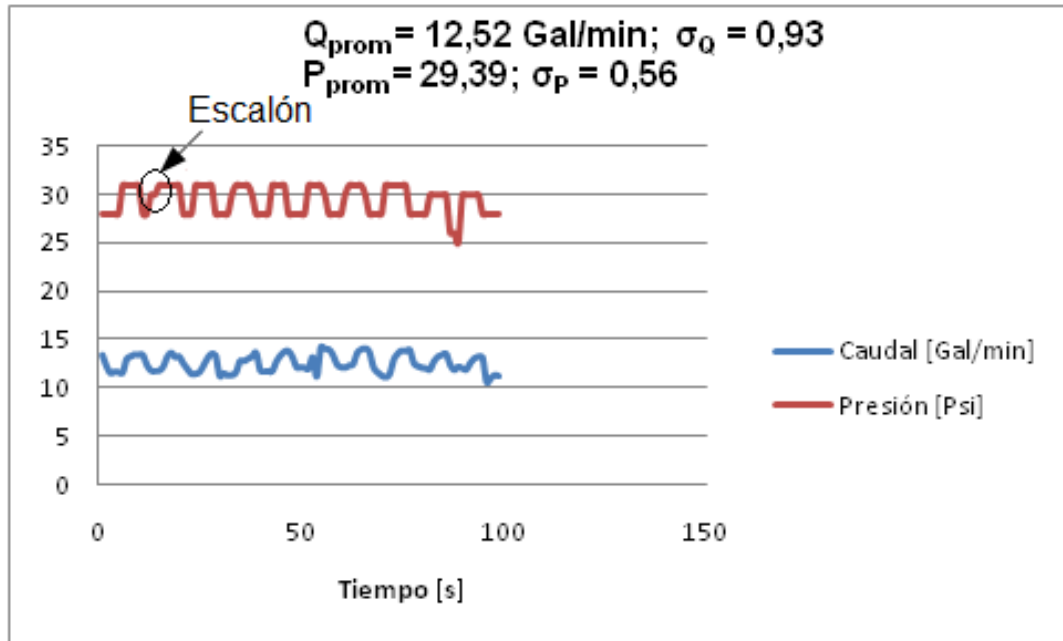
5.10.2.1 Análisis de Prueba 9b.

Al principio de la prueba la Figura 40 ilustra una pulsación en la presión que se debe a la manipulación de los controles de las válvulas. Después de controlar el ciclo de operación de cada cámara se muestra que el sistema se estabiliza.

5.10.3 Prueba 9c.

Estrangulamiento de la válvula: una vuelta y media

Figura 41. Gráfica Prueba No 9c

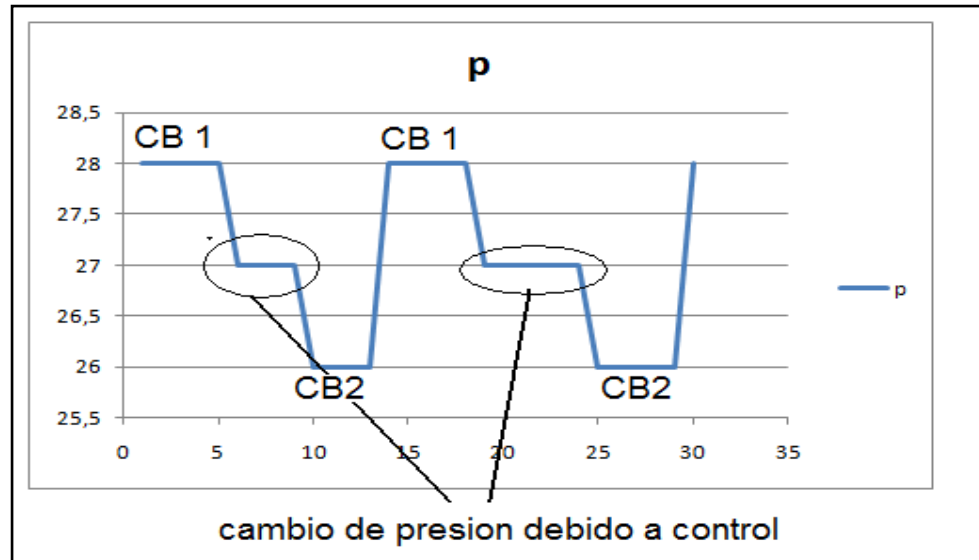


Fuente: Los autores

5.10.3.1 Análisis de Prueba 9c.

En la figura 41 se resalta una variación de la presión en forma de escalón, que se debe a la manipulación del banco de control, esto sucede en los tiempos donde las dos cámaras de bombeo descargan de forma simultánea, la presión se estabiliza aun valor medio entre las dos presiones de descarga, (ver figura 42).

Figura 42. Gráfica de las CB descargando simultáneamente

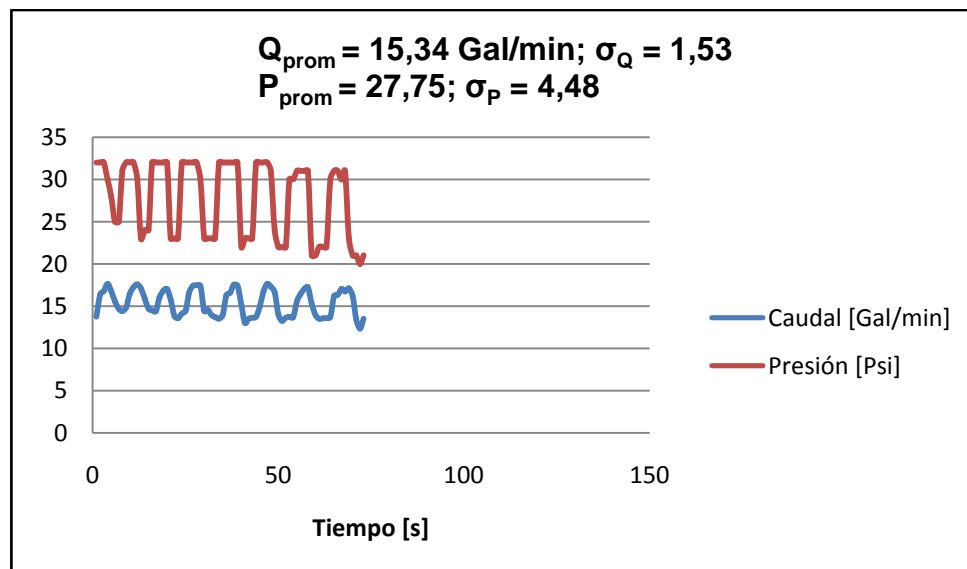


Fuente: Los autores

5.10.4 Prueba 9d.

Estrangulamiento de la válvula: una vuelta

Figura 43. Gráfica Prueba No 9d



Fuente: Los autores

5.10.4.1 Análisis de Prueba 9d.

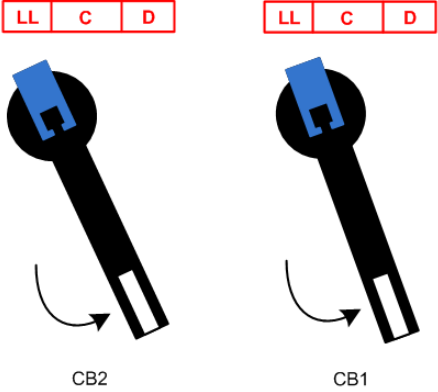
En esta prueba se puede observar que la inestabilidad en el caudal y la presión se refleja en un aumento considerable de σ_P y σ_Q , la abertura utilizada en la válvula de compuerta produjo que la descarga de cada cámara se realizara en un menor tiempo, lo cual aumentó la complejidad del control de los ciclos de llenado y descarga de las cámaras de bombeo, modificando el comportamiento del caudal. Este comportamiento es similar al descrito en la Figura 35.

5.11 ANÁLISIS GENERALES

Al comenzar las pruebas se observó que los tiempos de llenado y descarga a altos caudales (para nuestro caso superior a 14 GPM) eran demasiado cortos, lo cual dificultó el control correcto del prototipo, generando errores en la toma de datos; los cuales mostraban comportamientos nada uniformes, además que es muy difícil mantener la secuencia de llenado y descarga de las dos cámaras de bombeo. Por esta razón se trabajó a diferentes presiones con caudales entre 7 y 14 GPM.

Al revisar las gráficas de tiempo vs presión y caudal se observaron pequeñas irregularidades entre los tiempos de descarga de una y otra cámara de bombeo. Al revisar los videos se encontró que por instantes ocurrían las siguientes secuencias:

Tabla 7. Análisis del manejo de controles

 <p>Diagram illustrating the state of two pumps, CB2 and CB1, during a transition. The valves are in the 'C' (Close) position. Arrows indicate flow direction. Above each pump is a control panel with three buttons labeled 'LL', 'C', and 'D'.</p>	<p>Cuando se está en el paso 2 o 4 y se debe pasar al paso 3 o 5 respectivamente, al menos por un instante puede ocurrir que las dos cámaras de bombeo descarguen caudal al mismo tiempo generando un aumento en caudal y una variación en la presión del manómetro aguas abajo de las cámaras.</p>
 <p>Diagram illustrating the state of two pumps, CB2 and CB1, during a transition. The valves are in the 'D' (Discharge) position. Arrows indicate flow direction. Above each pump is a control panel with three buttons labeled 'LL', 'C', and 'D'.</p>	<p>Si la válvula de paso se gradúa a un alto caudal (superior a 14 GPM para nuestro caso) y la secuencia de control se encuentra en el paso 2 o 4 y se debe pasar al paso 3 o 5 respectivamente, al menos por un instante ocurre que las dos cámaras de bombeo hagan llenado simultaneo, disminuyendo el caudal medido y generando una variación en la presión del manómetro aguas abajo de las cámaras.</p>

Fuente: Los autores

Estas secuencias generan un cambio en las mediciones tanto de caudal como de presión.

Otro de los aspectos que afectan el funcionamiento del prototipo es la relación de tiempo de funcionamiento de una de las cámaras de bombeo con respecto a la otra, si se selecciona una como principal y la otra como auxiliar (la cámara auxiliar solo descarga en el tiempo que requiere la cámara principal para llenarse) se pueden reducir los picos de presión (y de caudal) que ocurren en el momento en que se pasa de descarga de una a la otra.

$$Rt = \frac{td_{CB1}}{td_{CB2}} \quad [Ec. 5.1]$$

Donde

Rt = relación de tiempo de funcionamiento

td = tiempo de descarga

Cuando Rt es igual a uno aparecen picos de presión en lapsos de tiempos iguales, pero si el valor es menor o mayor a uno (y la relación se mantiene durante todo el funcionamiento) los picos se alejarán, mientras sea mayor o menor el valor de Rt mas se alejaran los picos mejorando el funcionamiento del prototipo.

6. CONCLUSIONES

- ◆ El sistema de presurización de bomba sin pistones es una excelente opción en el campo de la propulsión de cohetes dado que a diferencia de las turbo – bombas y los sistemas de presión alimentada es más compacto, posee tanques de almacenamiento livianos, consta de un menor número de componentes móviles y el proceso de construcción es menos costoso.
- ◆ En las pruebas donde la estrangulación era mayor, se presentaba un mejor comportamiento del caudal, a pesar que se manejara un mayor delta de presión, por esta razón, para mejores resultados se debe incluir en el sistema un dispositivo de control de caudal.
- ◆ Para lograr un mejor funcionamiento del prototipo se debe tener en cuenta la instalación de reductores de velocidad para evitar salpicaduras a la entrada de las cámaras de bombeo, y adicionalmente contar con sensores para optimizar el proceso de bombeo y llevar el flujo a valores no pulsantes.
- ◆ Se puede lograr un mejor funcionamiento al disminuir los tiempos de alternación de descarga entre una cámara de bombeo y otra, es decir operar una cámara como principal y la otra como auxiliar.
- ◆ El prototipo en gran parte se construyó en acrílico, lo cual permitió que se observara el funcionamiento, pero por otra parte no se pudo manejar deltas de presiones más altas, por esta razón se pueden emplear materiales más resistentes debido a que ya se conoce el comportamiento, y de esta manera aplicarse en un cohete real.

- ◆ Este sistema de presurización es óptimo para la propulsión de cohetes lanzados al espacio exterior, ya que el delta de presión a venteo aumenta, incrementando el caudal y la eficiencia.
- ◆ Este sistema se puede utilizar para diferentes aplicaciones, dado que usa como presurizante un gas inerte el cual no daña las propiedades del producto, además no requiere de sustancias anexas para su funcionamiento, ni complicados sistemas de transmisión de potencia.

7. RECOMENDACIONES

- ◆ El potencial de este sistema de presurización es de gran importancia ya que aporta al desarrollo de la tecnología sobre propulsión de cohetes. Al contar con los instrumentos y materiales adecuados se puede lograr mejores resultados, por esta razón, se recomienda para la siguiente fase de este proyecto utilizar sensores de nivel, PLC, válvulas electromagnéticas, toma de datos y control en tiempo real con labview.

BIBLIOGRAFÍA

- ◆ HARRINGTON, Steve. “*Pistonless Dual Chamber Rocket Fuel Pump*”. [citado en 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit 20-23 July 2003, Huntsville Alabama]. Portable Document Format. Disponible desde:
http://www.flometrics.com/rockets/rocket_pump/rocketpump.htm

- ◆ HARRINGTON, Steve. “*Launch Vehicle and Spacecraft System Design Using the Pistonless Pump*”. [citado en Space 2004 Conference and Exhibit 28 – 30 September 2004, San Diego, California]. Portable Document Format. Disponible desde:
http://www.flometrics.com/rockets/rocket_pump/rocketpump.htm

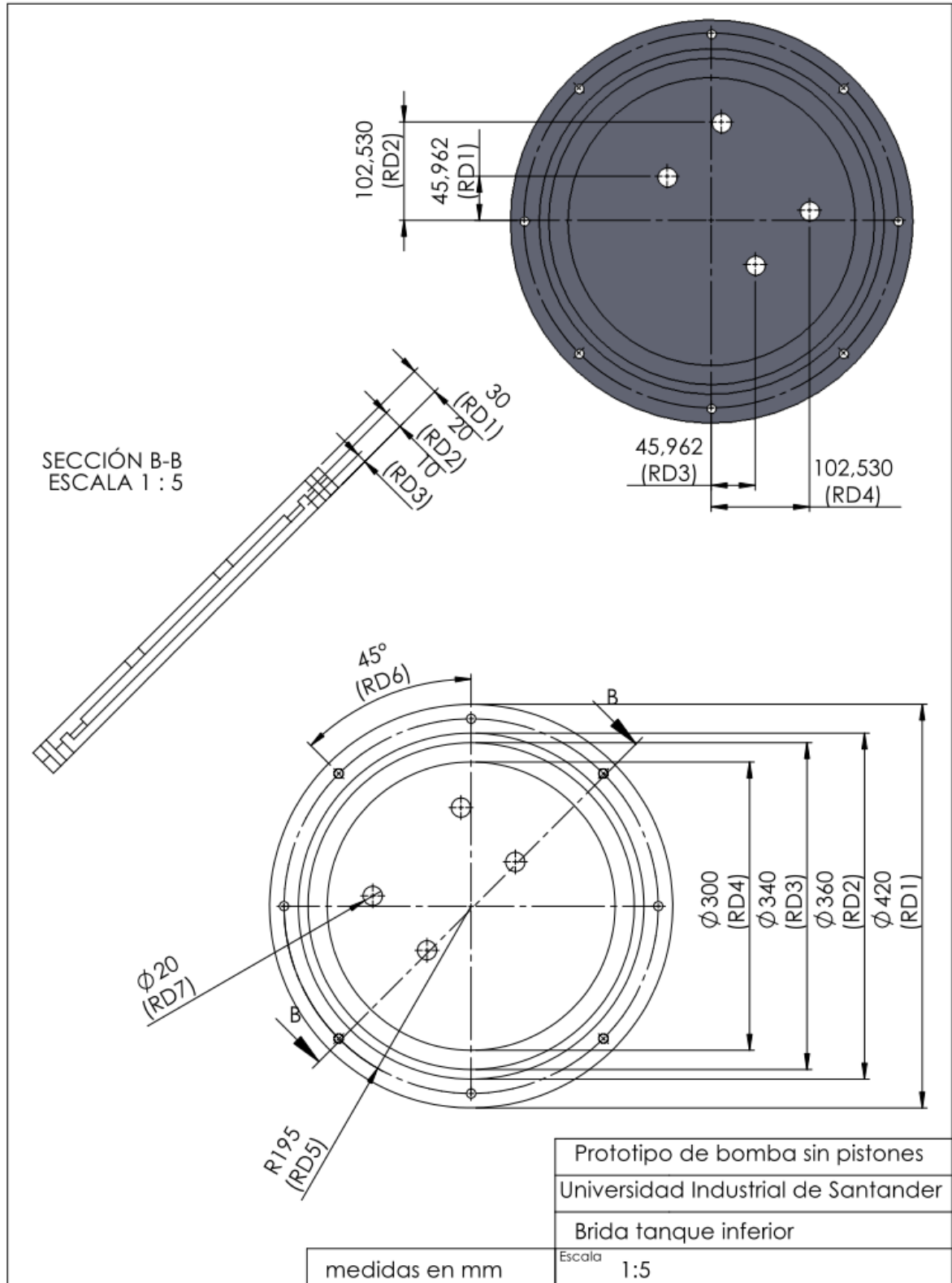
- ◆ HARRINGTON, Steve. “*Pistonless Pump For Crew Exploration Vehicle*”. [citado en 2004]. Portable Document Format. Disponible desde:
http://www.flometrics.com/rockets/rocket_pump/rocketpump.htm

- ◆ NAKKA, Richard. “*Teoría de los motores cohete*”. Portable Document Format. Disponible desde: http://www.nakka-rocketry.net/articles/teoria_de_los_motores_cohete.pdf

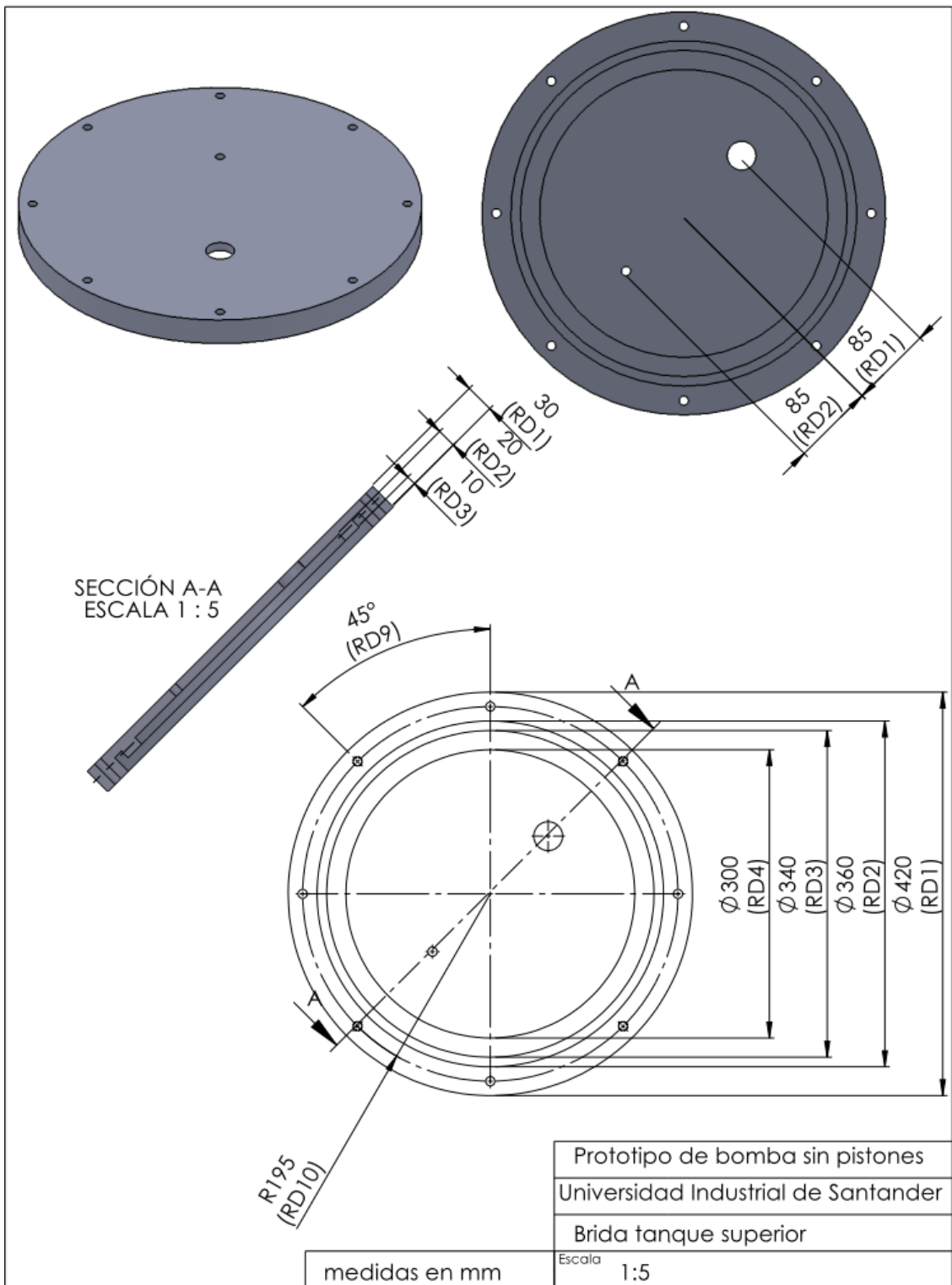
- ◆ MARADEY, Juan Francisco. “*Termodinámica Aplicada*”, Ediciones UIS, 2002.

- ◆ LEÓN, Juan Manuel. “*Diseño y cálculo de recipientes a presión*”. 2001. Portable Document Format. Disponible desde:
<http://www.scribd.com/doc/17247549/disen-y-calculo-de-recipientes-a-presion>.

Anexo A. Planos

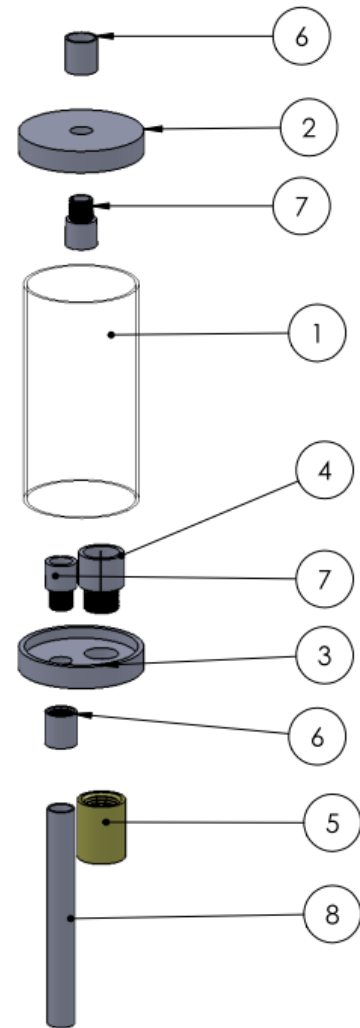


Anexo A. Planos



Anexo A. Planos

1	cilindro camara de bobmeo	1
2	tapa superior	1
3	tapa inferior	1
4	adaptador hembra 1"	1
5	cheque 1"	1
6	adaptador hembra 1/2"	2
7	adaptador macho 1/2"	2
8	tubo 1/2"	1

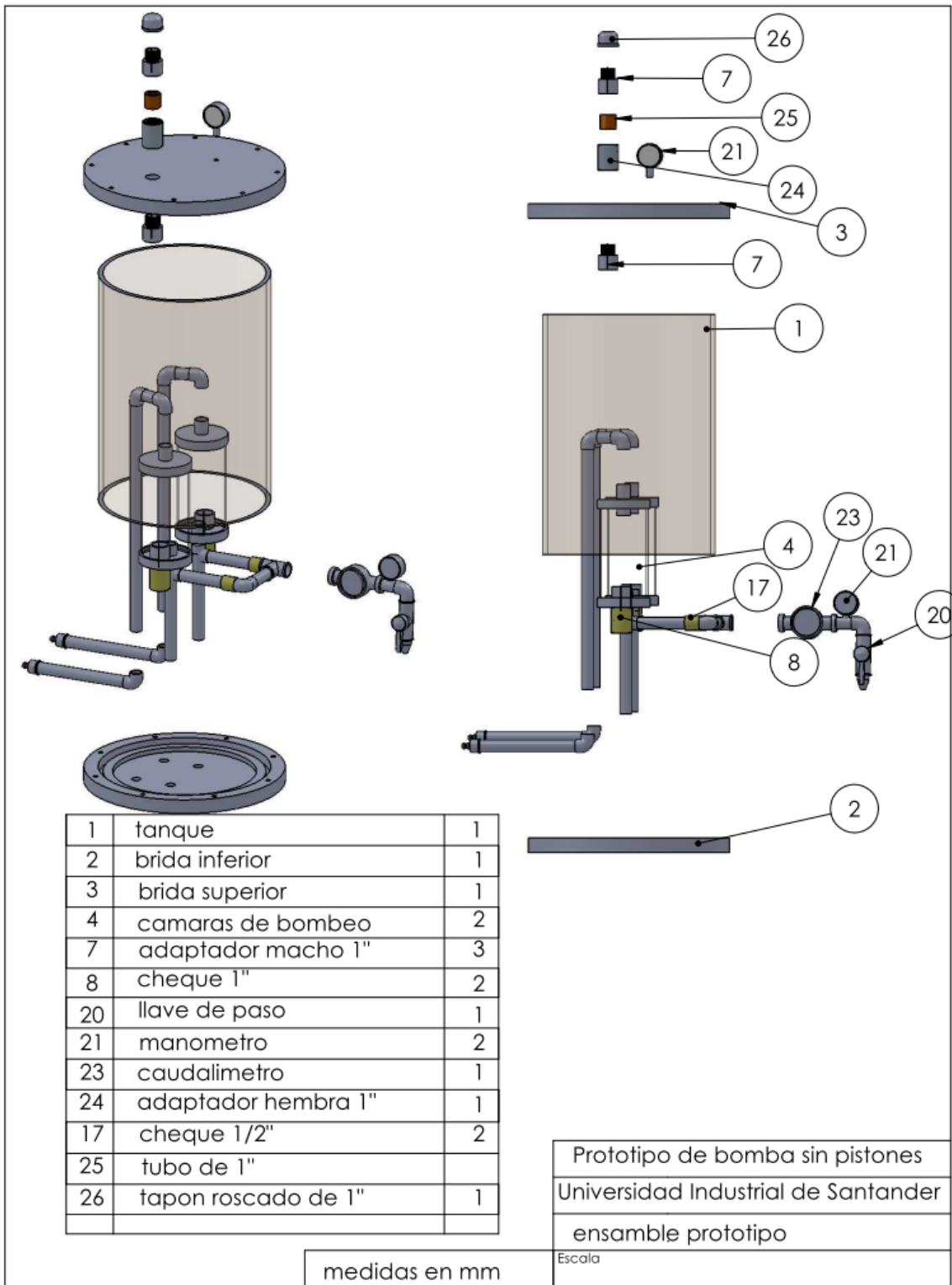


Prototipo de bomba sin pistones
 Universidad Industrial de Santander
 ensamble camara de bombeo

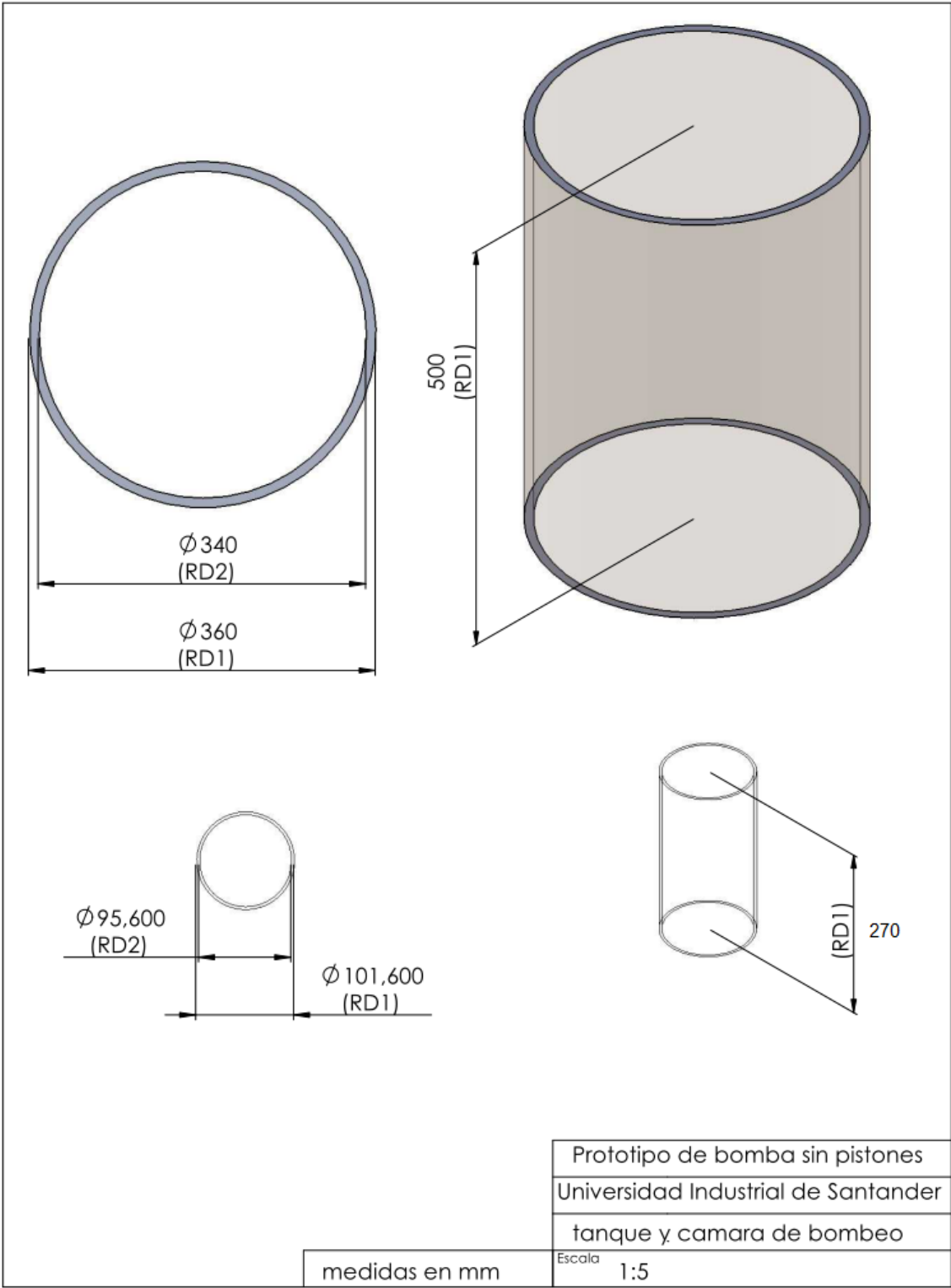
medidas en mm

Escala

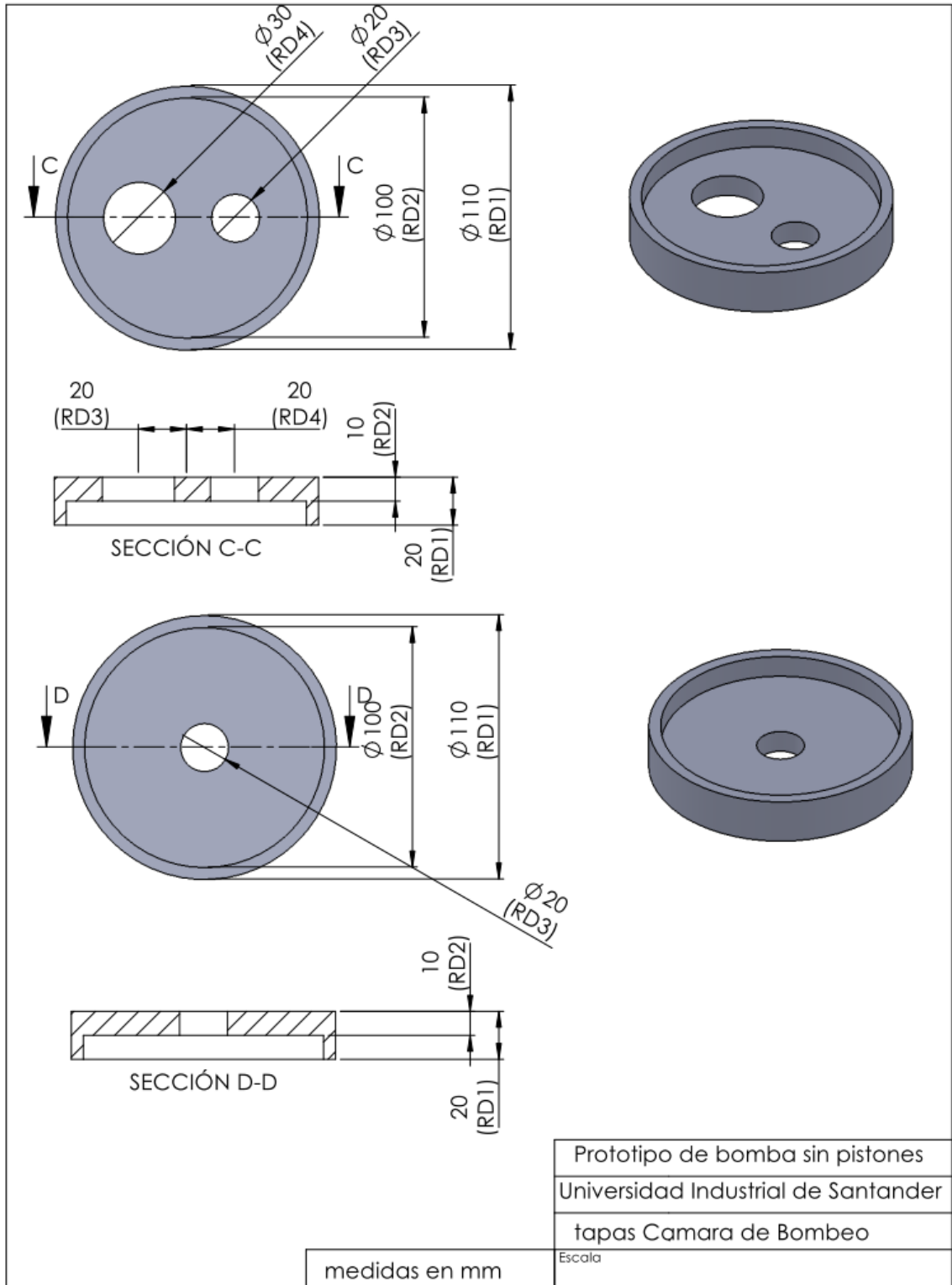
Anexo A. Planos



Anexo A. Planos



Anexo A. Planos



Anexo B. Datos de las pruebas realizadas

Tabla Prueba No. 1					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
1	8,7	12	34	8,99	12
2	8,93	12	35	8,94	11
3	8,95	12	36	8,96	11
4	8,72	12	37	8,73	11
5	8,6	12	38	8,6	11
6	8,54	12	39	8,5	11
7	8,42	12	40	8,43	12
8	8,2	12	41	8,13	12
9	8,1	11	42	8,16	12
10	8,15	11	43	8,16	12
11	7,92	11	44	7,8	12
12	8,73	11	45	8,78	12
13	8,94	11	46	8,9	12
14	8,9	12	47	8,9	12
15	8,72	12	48	8,78	11
16	8,65	12	49	8,61	11
17	8,53	12	50	8,53	11
18	8,42	12	51	8,44	11
19	8,18	12	52	8,15	11
20	8,12	12	53	8,18	12
21	8,17	12	54	8,15	12
22	7,93	11	55	7,91	12
23	8,65	11	56	8,74	12
24	8,93	11	57	8,95	12
25	8,92	11	58	8,96	12
26	8,75	11	59	8,77	12
27	8,62	12	60	8,6	12
28	8,5	12	61	8,58	11
29	8,45	12	62	8,42	11
30	8,12	12	63	8,23	11
31	8,17	12	64	8,16	11
32	8,16	12	65	8,16	11
33	7,93	12	66	8,73	12

Continuación Tabla Prueba No. 1					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
67	8,99	12	99	8,43	12
68	8,9	12	100	8,13	11
69	8,87	12	101	8,16	11
70	8,74	12	102	8,7	11
71	8,8	12	103	8,64	11
72	8,5	12	104	8,54	11
73	8,2	12	105	8,4	12
74	8,16	11	106	8,16	12
75	8,16	11	107	8,1	12
76	8,53	11	108	8,16	12
77	8,42	11	109	8,15	12
78	8,18	11	110	8,18	12
79	8,12	12	111	8,15	12
80	8,17	12	112	7,91	12
81	7,93	12	113	8,74	11
82	8,65	12	114	8,95	11
83	8,93	12	115	8,96	11
84	8,92	12	116	8,77	11
85	8,75	12	117	8,6	11
86	8,62	12	118	8,58	12
87	8,5	11	119	8,42	12
88	8,45	11	120	8,23	12
89	8,12	11	121	8,16	12
90	8,17	11	122	8,16	12
91	8,16	11	123	8,73	12
92	7,93	12	124	8,99	12
93	8,99	12	125	8,9	12
94	8,94	12	126	8,54	11
95	8,96	12	127	8,4	11
96	8,73	12	128	8,16	11
97	8,6	12	129	8,1	11
98	8,5	12	130	8,16	11

Tabla Prueba No. 2					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
1	8,7	11	34	8,99	10
2	8,78	11	35	8,94	10
3	8,85	11	36	8,96	10
4	8,56	11	37	8,73	10
5	8,44	11	38	8,6	10
6	8,73	11	39	8,5	10
7	8,8	10	40	8,43	11
8	8,82	10	41	8,43	11
9	8,76	10	42	8,42	11
10	8,85	10	43	8,55	11
11	8,9	10	44	8,8	11
12	8,73	10	45	8,78	11
13	8,94	10	46	8,9	10
14	8,9	11	47	8,9	10
15	8,72	11	48	8,78	10
16	8,75	11	49	8,61	10
17	8,73	11	50	8,53	10
18	8,62	11	51	8,44	10
19	8,64	11	52	8,4	10
20	8,62	10	53	8,43	11
21	8,57	10	54	8,5	11
22	8,93	10	55	8,72	11
23	8,65	10	56	8,74	11
24	8,93	10	57	8,95	11
25	8,92	10	58	8,96	11
26	8,75	10	59	8,77	10
27	8,62	11	60	8,6	10
28	8,5	11	61	8,58	10
29	8,45	11	62	8,42	10
30	8,42	11	63	8,43	10
31	8,37	11	64	8,58	10
32	8,46	11	65	8,6	10
33	8,93	10	66	8,73	11

Continuación Tabla Prueba No. 2					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
67	8,99	11	99	8,43	10
68	8,9	11	100	8,13	10
69	8,87	11	101	8,16	10
70	8,74	11	102	8,7	10
71	8,8	11	103	8,64	10
72	8,5	10	104	8,54	10
73	8,63	10	105	8,4	11
74	8,65	10	106	8,52	11
75	8,74	10	107	8,54	11
76	8,53	10	108	8,6	11
77	8,42	10	109	8,55	11
78	8,38	10	110	8,62	11
79	8,43	11	111	8,72	10
80	8,58	11	112	8,91	10
81	8,93	11	113	8,74	10
82	8,65	11	114	8,95	10
83	8,93	11	115	8,96	10
84	8,92	11	116	8,77	10
85	8,75	10	117	8,6	10
86	8,62	10	118	8,58	11
87	8,5	10	119	8,42	11
88	8,45	10	120	8,23	11
89	8,47	10	121	8,16	11
90	8,67	10	122	8,16	11
91	8,8	10	123	8,73	11
92	8,8	11	124	8,99	10
93	8,83	11	125	8,9	10
94	8,83	11	126	8,54	10
95	8,82	11	127	8,4	10
96	8,73	11	128	8,16	10
97	8,6	11	129	8,1	10
98	8,5	10	130	8,16	10

Tabla Prueba No. 3					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
1	12,3	16	36	11,73	16
2	12,24	16	37	12,63	16
3	12,18	16	38	12,42	16
4	11,58	16	39	12,89	16
5	11,82	16	40	12,45	16
6	11,65	16	41	12,33	16
7	12,63	16	42	11,48	14
8	12,32	14	43	11,23	14
9	12,49	14	44	11,33	14
10	12,45	14	45	11,48	14
11	12,43	14	46	11,63	14
12	11,48	15	47	12,21	16
13	11,23	16	48	12,32	16
14	11,33	16	49	12,45	16
15	11,48	16	50	12,33	16
16	11,63	16	51	12,55	16
17	12,21	16	52	12,74	16
18	12,32	16	53	12,63	16
19	12,45	15	54	12,56	14
20	12,33	14	55	12,33	14
21	12,55	14	56	12,25	14
22	12,74	14	57	11,83	14
23	12,63	14	58	11,78	15
24	12,56	16	59	11,85	16
25	12,33	16	60	12,33	16
26	12,25	16	61	12,55	16
27	11,83	16	62	12,74	16
28	11,78	16	63	12,63	16
29	11,75	16	64	12,56	16
30	11,69	16	65	12,33	16
31	11,63	14	66	12,25	14
32	11,61	14	67	11,56	14
33	11,75	14	68	11,8	14
34	11,77	14	69	11,75	14
35	11,82	15	70	12,53	15

Continuación Tabla Prueba No. 3					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
71	12,32	16	104	12,33	14
72	12,29	16	105	11,48	16
73	12,45	16	106	11,23	16
74	12,33	16	107	11,33	16
75	11,88	16	108	11,48	16
76	11,73	16	109	11,63	16
77	11,53	15	110	12,21	16
78	11,49	14	111	12,32	16
79	11,73	14	112	12,45	14
80	12,11	14	113	12,33	14
81	12,22	14	114	12,55	14
82	12,35	16	115	12,74	14
83	12,38	16	116	12,63	16
84	12,55	16	117	12,56	16
85	12,74	16	118	12,33	16
86	12,63	16	119	12,25	16
87	12,56	16	120	11,73	16
88	12,33	16	121	11,75	14
89	12,25	14	122	11,75	14
90	11,83	14	123	11,79	14
91	11,78	14	124	11,73	14
92	12,11	14	125	11,71	14
93	12,22	15	126	12,74	16
94	12,35	16	127	12,63	16
95	12,38	16	128	12,56	16
96	12,55	16	129	12,33	16
97	12,74	16	130	12,25	14
98	12,63	16	131	12,89	14
99	12,56	16	132	12,45	14
100	12,33	14	133	12,33	14
101	12,25	14	134	11,85	14
102	12,89	14	135	11,57	14
103	12,45	14	136	11,82	15

Tabla Prueba No. 4					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
1	12	15,5	35	11,82	16
2	12,5	15,53	36	11,73	16
3	11,16	16	37	11,61	16
4	11,58	17	38	11,56	16
5	11,83	17	39	11,89	17
6	11,64	17	40	11,45	17
7	11,63	16	41	11,33	17
8	11,31	16	42	11,48	17
9	11,44	16	43	11,23	17
10	11,47	16	44	11,33	17
11	11,43	17	45	11,48	16
12	11,48	17	46	11,63	16
13	11,22	17	47	11,21	16
14	11,33	17	48	11,32	16
15	11,48	16	49	11,45	17
16	11,63	16	50	11,33	17
17	11,23	16	51	11,55	17
18	11,32	16	52	11,74	17
19	11,46	16	53	11,63	16
20	11,33	17	54	11,56	16
21	11,52	17	55	11,33	16
22	11,75	17	56	11,25	16
23	11,63	17	57	11,83	16
24	11,55	16	58	11,78	17
25	11,33	16	59	11,85	17
26	11,27	16	60	11,32	17
27	11,32	16	61	11,55	17
28	11,78	16	62	11,74	16
29	11,75	17	63	11,65	16
30	11,68	17	64	11,56	16
31	11,63	17	65	11,33	16
32	11,61	17	66	11,25	16
33	11,73	17	67	11,56	17
34	11,74	16	68	11,8	17

Continuación Tabla Prueba No. 4					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
69	11,75	17	101	11,23	16
70	11,53	17	102	11,79	16
71	11,32	17	103	11,45	16
72	11,29	16	104	11,53	16
73	11,45	16	105	11,49	17
74	11,33	16	106	11,36	17
75	11,88	16	107	11,33	17
76	11,73	16	108	11,48	17
77	11,53	17	109	11,63	17
78	11,49	17	110	11,21	16
79	11,73	17	111	11,32	16
80	11,11	17	112	11,45	16
81	11,22	17	113	11,33	16
82	11,35	17	114	11,55	16
83	11,38	16	115	11,74	17
84	11,55	16	116	11,63	17
85	11,74	16	117	11,53	17
86	11,63	16	118	11,33	17
87	11,56	17	119	11,25	17
88	11,33	17	120	11,73	17
89	11,25	17	121	11,75	16
90	11,83	17	122	11,75	16
91	11,78	16	123	11,79	16
92	11,11	16	124	11,73	16
93	11,22	16	125	11,71	16
94	11,35	16	126	11,74	17
95	11,38	16	127	11,63	17
96	11,55	17	128	11,56	17
97	11,74	17	129	11,33	16
98	11,63	17	130	11,25	16
99	11,56	17	131	11,89	16
100	11,33	16	132	11,45	16

Tabla Prueba No. 5					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
1	13,3	20	34	11,46	20
2	12,42	20	35	11,34	20
3	11,76	20	36	11,46	20
4	11,76	20	37	11,46	23
5	11,64	20	38	11,7	23
6	11,5	23	39	13,32	23
7	13	23	40	13,26	23
8	13,62	23	41	13,2	23
9	13,86	23	42	13,02	23
10	13,74	22	43	10,62	20
11	12,36	20	44	11,16	20
12	12	20	45	11,16	20
13	11,6	20	46	11,2	23
14	11,28	20	47	11,52	23
15	11,34	23	48	12,54	23
16	11,46	23	49	13	23
17	12,9	23	50	13,2	23
18	13,32	23	51	13,26	22
19	13,62	23	52	12,54	20
20	13,44	23	53	11,52	20
21	13,68	20	54	11,22	20
22	11,9	20	55	11,22	20
23	11,4	20	56	11,2	20
24	11,4	20	57	11,46	23
25	11,14	20	58	12,66	23
26	11,46	23	59	12,84	23
27	12,66	23	60	13,38	23
28	13,02	23	61	13,8	23
29	13,26	23	62	12	21
30	13,2	23	63	10,9	20
31	13,2	23	64	11,16	20
32	13	20	65	11,64	20
33	11,52	20	66	11,8	20

Continuación Tabla Prueba No. 5					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
67	11,02	20	79	11,5	23
68	11,4	23	80	11,58	23
69	11,46	23	81	13,2	23
70	12,96	23	82	13	23
71	13,68	23	83	13,26	23
72	13,56	23	84	13,56	23
73	13,56	23	85	12,9	20
74	13,62	20	86	11,9	20
75	10,68	20	87	11,6	20
76	10,92	20	88	11,2	20
77	11,5	20	89	11,22	20
78	12,3	20	90	11,2	23

Tabla Prueba No. 6					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
1	9,72	22	35	8,94	20
2	10,08	22	36	8,98	22
3	10,2	22	37	9,48	22
4	10,32	22	38	9,96	22
5	9,96	20	39	10,32	22
6	9,72	20	40	10,26	22
7	9	20	41	10,38	22
8	9	20	42	10,32	22
9	8,94	20	43	10,08	20
10	9,06	20	44	9,3	20
11	9,18	22	45	9,18	20
12	9,96	22	46	9,12	20
13	10,14	22	47	9,06	20
14	10,08	22	48	9	20
15	10,26	22	49	9,18	22
16	10,26	22	50	9,96	22
17	10,08	21	51	10,08	22
18	10,08	20	52	10,26	22
19	9,35	20	53	10,08	22
20	9,12	20	54	10,14	22
21	9,04	20	55	10,14	21
22	9	20	56	9,6	20
23	9,24	22	57	9	20
24	9,48	22	58	8,94	20
25	10,14	22	59	8,88	20
26	10,44	22	60	8,82	20
27	10,5	22	61	8,94	22
28	10,21	22	62	9,12	22
29	9,84	22	63	9,9	22
30	10,14	22	64	10,14	22
31	9,54	20	65	10,02	22
32	9,12	20	66	9,9	22
33	8,82	20	67	10,14	22
34	8,88	20	68	10,32	20

Continuación Tabla Prueba No. 6					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
69	9,6	20	92	10,2	22
70	9,12	20	93	10,14	22
71	9,16	20	94	9,96	21
72	8,94	20	95	9,54	20
73	8,89	20	96	9,1	20
74	8,82	22	97	9,24	20
75	10,02	22	98	9	20
76	10,32	22	99	9,06	20
77	10,32	22	100	9,18	21
78	10,2	22	101	9,44	22
79	10,02	22	102	10,08	22
80	10,14	22	103	10	22
81	9,66	20	104	10,08	22
82	9,12	20	105	10,2	22
83	9,06	20	106	10,14	22
84	8,94	20	107	10	21
85	9	20	108	9,66	20
86	9,24	20	109	9,54	20
87	9,3	22	110	9,24	20
88	9,96	22	111	9,12	20
89	10,28	22	112	9,06	20
90	10,2	22	113	8,88	20
91	10,2	22	114	8,94	20

Tabla Prueba No. 7					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
1	8,46	28	36	7,8	26
2	8,88	28	37	7,8	26
3	8,94	28	38	7,9	26
4	8,64	28	39	7,96	28
5	8,7	26	40	8,4	28
6	8,46	26	41	8,76	28
7	8,04	26	42	8,76	28
8	7,9	26	43	8,7	28
9	8,16	26	44	8,76	28
10	8,22	26	45	8,76	28
11	8,28	26	46	8,54	26
12	8,1	28	47	8,22	26
13	8,34	28	48	7,86	26
14	8,76	28	49	7,86	26
15	8,82	28	50	7,74	26
16	8,7	28	51	7,6	28
17	8,7	28	52	7,8	28
18	8,76	28	53	8,2	28
19	8,76	28	54	8,58	28
20	8,34	26	55	8,64	28
21	7,92	26	56	8,7	28
22	7,86	26	57	8,52	28
23	7,86	26	58	8,7	28
24	7,86	26	59	8,04	26
25	7,8	26	60	7,92	26
26	7,96	28	61	7,96	26
27	8,4	28	62	7,86	26
28	8,76	28	63	7,8	26
29	8,7	28	64	7,6	28
30	8,8	28	65	7,16	28
31	8,8	28	66	8,58	28
32	8,76	28	67	8,64	28
33	8,5	26	68	8,58	28
34	7,9	26	69	8,58	28
35	7,92	26	70	8,58	28

Continuación Tabla Prueba No. 7					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
71	8,64	28	106	7,6	28
72	8,46	28	107	8,16	28
73	7,98	26	108	8,8	28
74	7,74	26	109	8,8	28
75	7,74	26	110	8,78	28
76	7,86	26	111	8,7	28
77	7,62	26	112	8,82	28
78	7,5	28	113	7,74	26
79	7,92	28	114	7,6	26
80	8,58	28	115	8,7	26
81	8,76	28	116	8,58	26
82	8,76	28	117	8,35	26
83	8,7	28	118	8,16	28
84	8,58	28	119	8,82	28
85	8,64	28	120	8,82	28
86	8,52	26	121	8,72	28
87	7,12	26	122	8,94	28
88	7,74	26	123	9	28
89	7,62	26	124	8,82	28
90	7,86	26	125	8,86	28
91	7,68	26	126	8,32	26
92	7,86	28	127	8,04	26
93	8,34	28	128	7,8	26
94	8,64	28	129	7,8	26
95	8,64	28	130	7,68	26
96	8,76	28	131	7,5	26
97	8,76	28	132	7,56	28
98	8,52	28	133	8,76	28
99	8,1	26	134	8,76	28
100	7,98	26	135	8,64	28
101	7,86	26	136	8,58	28
102	7,74	26	137	8,76	28
103	7,6	26	138	8,52	28
104	7,6	26	139	8,28	27
105	7,68	26	140	8,28	26

Continuación Tabla Prueba No. 7					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
141	7,98	26	145	7,74	28
142	7,6	26	146	7,74	28
143	7,62	26	147	7,86	28
144	7,5	26	148	8,52	28

Tabla Prueba No. 8					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
1	7,56	29,5	36	7,57	27
2	7,29	28	37	7,45	27
3	7,25	28	38	7,41	27
4	7,33	28	39	7,56	28
5	7,2	28	40	7,45	28
6	7,37	28	41	7,74	28
7	7,23	27	42	7,76	28
8	7,7	27	43	7,72	28
9	7,46	27	44	7,67	28
10	7,25	27	45	7,78	28
11	7,27	28	46	7,63	27
12	7,65	28	47	7,58	27
13	7,35	28	48	7,68	27
14	7,63	28	49	7,54	27
15	7,62	28	50	7,75	27
16	7,71	28	51	7,63	27
17	7,56	28	52	7,5	27
18	7,78	28	53	7,2	28
19	7,65	28	54	7,58	28
20	7,45	27	55	7,64	28
21	7,93	27	56	7,7	28
22	7,17	27	57	7,52	28
23	7,17	27	58	7,7	28
24	7,23	27	59	7,04	27
25	7,32	28	60	7,52	27
26	7,15	28	61	7,46	27
27	7,22	28	62	7,56	27
28	7,79	28	63	7,12	27
29	7,73	28	64	7,6	27
30	7,82	28	65	7,16	27
31	7,81	28	66	7,58	28
32	7,77	28	67	7,64	28
33	7,63	27	68	7,58	28
34	7,78	27	69	7,58	28
35	7,62	27	70	7,58	28

Continuación Tabla Prueba No. 8					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
71	7,64	28	106	7,76	28
72	7,46	28	107	7,16	28
73	7,18	27	108	6,92	28
74	7,74	27	109	7,2	28
75	7,74	27	110	7,28	28
76	7,16	27	111	7,2	28
77	7,62	27	112	7,12	28
78	7,5	28	113	7,74	27
79	7,12	28	114	7,6	27
80	7,58	28	115	7,7	27
81	7,76	28	116	7,58	27
82	7,76	28	117	7,35	27
83	7,7	28	118	7,16	27
84	7,58	28	119	6,99	27
85	7,64	28	120	7,12	28
86	7,52	27	121	7,72	28
87	7,12	27	122	7,14	28
88	7,74	27	123	7,15	28
89	7,62	27	124	7,12	28
90	7,16	27	125	7,16	28
91	7,68	27	126	7,32	27
92	7,16	28	127	7,04	27
93	7,34	28	128	7,2	27
94	7,64	28	129	7,3	27
95	7,64	28	130	7,68	27
96	7,76	28	131	7,5	27
97	7,76	28	132	7,56	28
98	7,52	28	133	7,76	28
99	7,1	27	134	7,76	28
100	6,98	27	135	7,64	28
101	7,26	27	136	7,58	28
102	7,24	27	137	7,76	28
103	7,6	27	138	7,52	28
104	7,6	27	139	7,28	27
105	7,68	27	140	7,28	27

Continuación Tabla Prueba No. 8					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
141	7,98	27	144	7,5	27
142	7,6	27	145	7,74	28
143	7,68	27	146	7,54	28

Tabla Prueba No. 9a					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
1	7,26	30	36	7,26	35
2	7,26	32	37	7,44	35
3	7,26	32	38	7,56	35
4	7,56	32	39	7,56	35
5	7,56	35	40	7,68	35
6	7,56	35	41	7,56	35
7	7,6	35	42	7,62	35
8	7,62	35	43	7,5	32
9	7,5	35	44	7,2	32
10	7,62	35	45	7,02	32
11	7,56	35	46	6,84	32
12	7,38	35	47	6,96	32
13	7,08	35	48	7,14	32
14	7,26	35	49	6,96	32
15	7,38	35	50	7,14	32
16	7,38	32	51	7,06	32
17	7,32	32	52	7,26	35
18	7,08	32	53	7,62	35
19	7,14	32	54	7,68	35
20	7,85	35	55	7,62	35
21	7,5	35	56	7,62	35
22	7,6	35	57	7,5	35
23	7,56	35	58	7,6	35
24	7,44	35	59	7,68	35
25	7,56	35	60	7,5	32
26	7,44	35	61	7,44	32
27	7,56	35	62	7,26	32
28	7,26	35	63	7,02	32
29	7,14	32	64	7,2	32
30	7,14	32	65	7,32	32
31	6,9	32	66	7,02	32
32	6,96	32	67	7,2	35
33	6,9	32	68	7,5	35
34	6,9	32	69	7,56	35
35	7,02	35	70	7,44	35

Continuación Tabla Prueba No. 9a					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
71	7,56	35	106	7,55	32
72	7,62	35	107	7,2	32
73	7,5	35	108	7,14	32
74	7,62	35	109	7,14	32
75	7,44	33	110	7,08	32
76	7,22	32	111	7,14	32
77	7,2	32	112	7,2	32
78	7,32	32	113	7,32	32
79	7,44	32	114	7,14	35
80	7,12	32	115	7,44	35
81	7,08	32	116	7,5	35
82	7,2	32	117	7,5	35
83	7,68	35	118	7,68	35
84	7,74	35	119	7,86	35
85	7,86	35	120	7,68	35
86	7,74	35	121	7,5	35
87	7,74	35	122	7,56	35
88	7,14	35	123	7,38	32
89	7,75	35	124	7,2	32
90	7,44	32	125	7,2	32
91	7,26	32	126	7,02	32
92	7,2	32	127	7,02	32
93	7,68	35	128	7,14	32
94	7,74	35	129	7,02	32
95	7,44	35	130	7,14	32
96	7,32	32	131	7,14	32
97	7,2	32	132	7,08	35
98	7,5	35	133	7,38	35
99	7,62	35	134	7,8	35
100	7,8	35	135	7,5	35
101	7,74	35	136	7,56	35
102	7,38	35	137	7,5	35
103	7,62	35	138	7,5	35
104	7,56	35	139	7,44	35
105	7,56	35	140	7,56	35

Continuación Tabla Prueba No. 9a					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
141	7,08	35	145	7,92	35
142	7,26	35	146	7,74	35
143	7,68	35	147	7,74	35
144	7,74	35	148	7,68	35

Tabla Prueba No. 9b					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
1	10,08	32	36	10,56	32
2	11,16	32	37	10,98	32
3	10,8	32	38	10,98	32
4	11,14	32	39	11,4	32
5	10,98	32	40	11,34	32
6	10,56	30	41	11,1	32
7	9,9	29	42	10,56	31
8	10,02	30	43	10,08	30
9	10,08	30	44	10,08	30
10	10,2	30	45	9,84	30
11	10,2	32	46	9,78	30
12	10,74	32	47	9,9	32
13	11,22	32	48	10,8	32
14	11,1	32	49	11,16	32
15	11,22	32	50	11,22	32
16	11,34	32	51	11,22	32
17	11,1	32	52	11,16	32
18	10,92	30	53	10,86	31
19	10,08	30	54	10,38	30
20	9,9	30	55	10,14	30
21	10,14	30	56	9,96	30
22	10,14	30	57	9,9	30
23	10,14	32	58	10,02	30
24	11,04	32	59	10,08	32
25	11,28	32	60	10,44	32
26	11,52	32	61	10,58	32
27	11,28	32	62	11,16	32
28	10,92	32	63	10,98	32
29	10,74	31	64	11,22	32
30	10,08	30	65	11,1	32
31	9,84	30	66	10,74	30
32	9,96	30	67	10,8	30
33	10,02	30	68	9,9	30
34	9,9	30	69	9,84	30
35	10,08	32	70	9,84	30

Continuación Tabla Prueba No. 9b					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
71	9,9	31	94	9,78	30
72	10,14	32	95	9,9	32
73	11,34	32	96	10,54	32
74	11,22	32	97	11,04	32
75	11,22	32	98	10,92	32
76	11,16	32	99	10,98	32
77	11,1	31	100	10,98	32
78	10,58	30	101	11,22	31
79	10,26	30	102	10,74	30
80	9,78	30	103	10,14	30
81	9,96	30	104	10,02	30
82	9,9	30	105	9,96	30
83	9,96	32	106	9,9	30
84	10,8	32	107	9,66	31
85	11,28	32	108	9,96	32
86	11,22	32	109	11,16	32
87	11,04	32	110	11,16	32
88	11,16	32	111	10,58	32
89	11,1	32	112	10,56	32
90	10,5	31	113	11,1	32
91	10,32	30	114	10,74	30
92	9,84	30	115	10,58	30
93	9,66	30	116	9,96	30

Tabla Prueba No. 9c					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
1	13,44	28	36	12,78	31
2	12,24	28	37	13,02	31
3	11,48	28	38	13,26	30
4	11,64	28	39	13,68	28
5	11,58	28	40	11,82	28
6	11,52	31	41	11,64	28
7	13,02	31	42	11,7	28
8	13,26	31	43	11,7	31
9	13,5	31	44	12,72	31
10	13,44	31	45	13,38	31
11	13,44	28	46	13,8	31
12	12,36	28	47	13,86	28
13	11,76	30	48	13,2	28
14	11,7	30	49	12,12	28
15	11,74	31	50	12,12	28
16	12,12	31	51	12,06	27
17	13,2	31	52	11,94	31
18	13,68	31	53	13,2	31
19	13,2	31	54	11,1	31
20	13,26	31	55	14,28	31
21	12,54	28	56	14,1	30
22	11,94	28	57	14,04	28
23	11,4	28	58	13,44	28
24	11,4	31	59	12,42	28
25	11,58	31	60	12,12	28
26	12,3	31	61	12,06	30
27	13,08	31	62	12,3	31
28	13,58	31	63	12,44	31
29	13,38	28	64	13,68	31
30	11,16	28	65	14,04	31
31	11,46	28	66	14,16	30
32	11,22	28	67	13,8	28
33	11,28	30	68	12,12	28
34	11,54	31	69	11,58	28
35	12,78	31	70	11,22	28

Continuación Tabla Prueba No. 9c					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
71	11,04	31	83	12,78	30
72	11,34	31	84	13,26	30
73	12,9	31	85	13,44	30
74	13,56	31	86	13,56	30
75	13,92	31	87	12,36	26
76	13,86	31	88	11,82	26
77	13,98	28	89	12,18	25
78	12,54	28	90	12	30
79	12,24	28	91	11,88	30
80	12,06	28	92	12,6	30
81	12	26	93	13,08	30
82	11,88	30	94	13,26	30

Tabla Prueba No. 9d					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
1	13,74	32	36	16,26	32
2	16,38	32	37	16,56	32
3	16,78	32	38	17,52	32
4	17,64	30	39	17,4	32
5	16,8	28	40	15,18	22
6	15,56	25	41	13,02	23
7	14,7	25	42	13,5	23
8	14,4	31	43	13,62	23
9	14,82	32	44	13,74	32
10	16,44	32	45	15	32
11	17,22	32	46	16,74	32
12	17,56	30	47	17,64	32
13	17,1	23	48	17,28	31
14	15,9	24	49	16,66	24
15	14,7	24	50	13,95	22
16	14,5	32	51	13,26	22
17	14,4	32	52	13,62	22
18	16	32	53	13,74	30
19	16,8	32	54	13,68	30
20	17	32	55	15,6	31
21	15,78	23	56	16,44	31
22	13,8	23	57	17,04	31
23	13,56	23	58	17,22	31
24	14,1	32	59	15,24	21
25	14,46	32	60	13,92	21
26	16,62	32	61	13,5	22
27	17,4	32	62	13,56	22
28	17,46	32	63	13,56	22
29	17,4	30	64	13,68	30
30	14,4	23	65	16,2	31
31	14,58	23	66	16,32	31
32	13,92	23	67	17,04	30
33	13,68	23	68	16,74	31
34	13,52	32	69	17,1	23
35	13,98	32	70	16,14	21

Continuación Tabla Prueba No. 9d					
Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]	Tiempo [s]	Caudal [Gal/min]	Presión [Psi]
71	13,44	21	72	12,35	20