

**DISEÑO MEDIANTE EXPERIMENTACIÓN, DE UN PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS QUE PERMITA CARACTERIZAR NUEVOS DISEÑOS Y DISEÑOS COMERCIALES DE SELLOS HIDRÁULICOS, SEGÚN EL ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE SELLADO Y CONFINAMIENTO DE LA PRESIÓN CON AYUDA DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS**

**MANUEL FERNANDO PITA UTRERA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

**DISEÑO MEDIANTE EXPERIMENTACIÓN, DE UN PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS QUE PERMITA CARACTERIZAR NUEVOS DISEÑOS Y DISEÑOS COMERCIALES DE SELLOS HIDRÁULICOS, SEGÚN EL ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE SELLADO Y CONFINAMIENTO DE LA PRESIÓN CON AYUDA DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS**

**MANUEL FERNANDO PITA UTRERA**

**Trabajo de grado para optar el título de ingeniero mecánico**

**Director**

**ABEL ANTONIO PARADA CORRALES**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

## CONTENIDO

	<b>pág.</b>
INTRODUCCIÓN	14
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	18
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	20
3.1 OBJETIVO GENERAL	20
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4. MARCO TEÓRICO	22
4.1 PRUEBA HIDROSTÁTICA	22
4.2 BRIDAS PARA TUBERÍAS	22
4.2.1 Tipo de cara	23
4.2.2 Tipos de unión a la tubería	25
4.2.3 Class de las bridas	28
4.3 SELLOS HIDRÁULICOS PARA BRIDAS	28
4.4 TORQUE EN UNIONES BRIDADAS	31
5. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS	33
5.1 DISEÑO CONCEPTUAL	33
5.1.1 Bancos de pruebas hidrostáticas en la industria	36
5.1.2 Dimensiones de los elementos del banco de pruebas	36
5.2 DISEÑO GENERAL Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA	41
5.2.1 Sistema de potencia	42
5.2.2 Sistema de pruebas	43
5.2.3 Instrumentación y control	49
5.2.4 Oportunidades de complementos	54
5.3 RESUMEN DEL DISEÑO FINAL	56
5.4 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA	58
5.4.1 Resultados del proceso de calibración	60

6. DISEÑO DE LA PRUEBA HIDROSTÁTICA	61
6.1 TORQUE A APLICAR	61
6.1.1 Mínima fuerza de compresión en la junta	62
6.1.2 Torque de apriete en los pernos	63
6.2 PROCEDIMIENTOS DE CARACTERIZACIÓN	65
6.2.1 Montaje del sello a evaluar	66
6.2.2 Prueba de goteo	67
6.2.3 Prueba hidrostática	73
6.2.4 Análisis de resultados de los procedimientos	77
6.3 EJECUCIÓN Y COMPROBACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS	78
6.3.1 Resultados obtenidos	82
6.4 PRUEBAS PRELIMINARES - NUEVO DISEÑO	83
7. CONTROL Y REGISTRO DE LAS PRUEBAS	86
7.1 Configuración y conexiones de hardware	87
7.1.1 Conexiones interfaz Arduino	88
7.1.2 Configuración del sensor de presión	89
7.1.3 Configuración del sensor de temperatura	90
7.1.4 Fuente de voltaje y referencia	91
7.1.5 Pulsador de presión de referencia	91
7.2 SOFTWARE DE CONTROL Y REGISTRO: HYTEST	92
8. CONCLUSIONES	97
9. RECOMENDACIONES	98
BIBLIOGRAFÍA	99
ANEXOS	97

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Presión en sello debido a torque	37
Tabla 2. Dimensiones agujeros bridas tipo RTJ – ASME B16.5	39
Tabla 3. Dimensiones brida tipo RF – ASME B16.5	40
Tabla 4. Configuración de bridas en el sistema	45
Tabla 5. Características Arduino UNO	50
Tabla 6. Presión de trabajo por Class	73
Tabla 7. Características del sello hidráulico	77
Tabla 8. Garlock BlueGard 3000	78
Tabla 9. Resultados Garlock BlueGard 3000	82
Tabla 10. Caracterización D250R	85
Tabla 11. Conexiones Arduino	88

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Brida FF	23
Figura 2. Brida RF	24
Figura 3. Bridas RTJ	24
Figura 4. Brida roscada	25
Figura 5. Brida Slip On	26
Figura 6. Brida Socket Welding	26
Figura 7. Brida Welding neck	27
Figura 8. Brida Lap Joint	27
Figura 9. Brida blind	28
Figura 10. Sello tipo E	29
Figura 11. Sello tipo F	30
Figura 12. Sellos tipo Ring	30
Figura 13. Orden de apriete de los pernos	31
Figura 14. Ficha técnica Garlock BlueGard	33
Figura 15. Ficha técnica US Pipe	34
Figura 16. Factores de control y medición	34
Figura 17. Fases de desarrollo del banco de pruebas	35
Figura 18. Ventajas y desventajas de sistemas comunes	36
Figura 19. Presión sobre el sello vs NPS	38
Figura 20. Dimensiones bridas RF – ASME B16.5	40

Figura 21. Esquema general del sistema	41
Figura 22. Bomba manual Enerpac P-39	43
Figura 23. Diseño #1	44
Figura 24. Diseño #2	46
Figura 25. Diseño final	47
Figura 26. Diseño final – un sello	48
Figura 27. Diseño final – “n” sellos	48
Figura 28. Arduino UNO	49
Figura 29. Sensor de presión Wika A10	50
Figura 30. Sensor de temperatura	52
Figura 31. Torquímetro	52
Figura 32. Cinta Teflón	53
Figura 33. Llaves mixtas	53
Figura 34. Cilindro de acople y separador de fluidos	55
Figura 35. Esquema final del banco de pruebas	57
Figura 36. Montaje brida RF 1” C150	57
Figura 37. Bridas adicionales disponibles	57
Figura 38. Sellos prioritarios a evaluar	58
Figura 39. Montaje de calibración	58
Figura 40. Ensamble estándar ASTM F2378	68
Figura 41. Simulación del estándar ASTM 2378	69
Figura 42. Relación torque – flujo de goteo	72

Figura 43. Temperatura durante el día	75
Figura 44. Prueba hidrostática – Garlock BlueGard 3000	79
Figura 45. Presión máxima del sello hidráulico	80
Figura 46. Montaje Garlock BlueGard 3000 –Prueba hidrostática	80
Figura 47. Garlock BlueGard 3000 – Después de prueba hidrostática	81
Figura 48. Prueba hidrostática D250R – Nuevo diseño	83
Figura 49. Prueba hidrostática D250R	84
Figura 50. Esquema de control y registro de datos	86
Figura 51. Hardware y conexiones	87
Figura 52. Configuración sensor de presión	89
Figura 53. LM35	90
Figura 54. Hytest	92
Figura 55. HyTest: Selección del sello	93
Figura 56. HyTest: Presión y Torque para la prueba	94
Figura 57. HyTest: Cálculo del torque	94
Figura 58. HyTest: Registro de datos	95

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
Anexo A. Bancos de pruebas hidrostáticas en la industria	101
Anexo B. Torque recomendado: Garlock compressed sheet and Gylon	104
Anexo C. Torque para esforzar pernos: Catálogo Garlock	105
Anexo D. Calibración del sistema	106
Anexo E. Elementos y accesorios para el sistema de pruebas	112
Anexo F. Circuitos y conexiones electrónicas	111
Anexo G. Sellos comerciales y nuevos diseños a evaluar	115
Anexo H. Tablas para el cálculo de torque en bridas	117
Anexo I. Número de pernos y diámetro para bridas ASME B16.5	119
Anexo J. Factor de fricción para pernos en acero	122
Anexo K. Algoritmos y formatos de procedimiento y caracterización	123
Anexo L. Código fuente tarjeta Arduino	130
Anexo M. Código fuente VisualStudio.net	132

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO MEDIANTE EXPERIMENTACIÓN, DE UN PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS QUE PERMITA CARACTERIZAR NUEVOS DISEÑOS Y DISEÑOS COMERCIALES DE SELLOS HIDRÁULICOS, SEGÚN EL ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE SELLADO Y CONFINAMIENTO DE LA PRESIÓN CON AYUDA DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS\*

**AUTOR:** MANUEL FERNANDO PITA UTRERA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Bridas, empaques, goteo en sellos, presión, prueba hidrostática, sellos hidráulicos, torque en bridas.

### **DESCRIPCIÓN:**

La realización de una prueba hidrostática, en términos generales permite conocer cómo se desempeña un determinado elemento sometido a condiciones de presión y temperatura, con el fin de determinar sus límites de operación para garantizar que sea seguro y confiable al ser usado en un sistema. Un sello hidráulico es uno de estos elementos, que en uniones bridadas de un sistema evitan que el fluido salga y adicionalmente mantienen la presión al interior del sistema.

El proceso de diseño de sellos hidráulicos, implica la aplicación de pruebas hidrostáticas que permitan caracterizar el empaque para un uso determinado, principalmente especificando la presión y temperatura de trabajo, y el torque máximo que se puede aplicar sobre el sello.

Curiosamente, no es sencillo ubicar una empresa que ofrezca pruebas o procedimientos dedicados a evaluar sellos hidráulicos o caracterizar sus propiedades según estándares internacionales.

En este proyecto, se diseñaron procedimientos basados en normas y estándares (ASME) los cuales permiten caracterizar nuevos diseños de sellos hidráulicos o comprobar el comportamiento de sellos comerciales.

Adicionalmente, se diseñó un sistema de control y registro para posteriormente manipular los datos de las pruebas, además de la programación de un software de apoyo para simplificar cálculos y procesos de registro durante una prueba hidrostática.

Los procedimientos de caracterización desarrollados en este proyecto fueron comprobados en sellos hidráulicos comerciales y comparados los resultados con sus fichas técnicas, validando así las pruebas diseñadas.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Ing. Abel Antonio Parada Corrales

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN BY EXPERIMENTATION OF A STANDARD PROCEDURE FOR HYDROSTATIC TEST FOR CHARACTERIZATION OF NEW AND COMMERCIAL DESIGNS OF HYDRAULIC GASKETS, ACCORDING TO THE ANALYSIS OF THE SEALABILITY AND KEEPING INTERNAL PRESSURE BY MEAN OF A HYDROSTATIC TEST SYSTEM\*

**AUTHOR:** MANUEL FERNANDO PITA UTRERA\*\*

**KEY WORDS:** Flanges, gaskets, gasket leaking, hydrostatic test, pressure, torque on flanges.

### **DESCRIPTION:**

A hydrostatic test, in general allows to know the performance of any element under conditions of pressure and temperature, in order to define the operation limits to be safe and reliable in any system. A gasket is one of those elements, which in flanged joints avoids leaking and keeps pressure inside the system.

The process to design gaskets, involves the application of hydrostatic tests that allow gasket characterization to any use, mainly by identifying pressure and working temperature, and maximum torque on gasket.

Interestingly enough, it is not easy to find an organization or enterprise which offers hydrostatic tests or procedures to evaluate hydraulic gaskets or characterize properties of gaskets according to international standards.

On this project, procedures based on ASME standards were designed which allow characterization of new gasket designs or commercial designs check-up.

In addition, a control and registration system was designed to save and manage data after tests; furthermore software support was programmed to simplify calculation and registration process under the hydrostatic test.

All the characterization procedures developed in this project were tested on commercial hydraulic gaskets and they were compared with their own technical information, which validate and make reliable all the tests designed in this project.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Engineering Physics Mechanics Faculty. Mechanical Engineer School. Director Eng. Abel Antonio Parada Corrales

## INTRODUCCIÓN

En medio del desarrollo técnico y tecnológico del mundo, las grandes industrias han investigado y desarrollado conocimiento que se pueda ser aplicado a un caso específico que mejore sus procesos o productos, esperando ser más eficiente o reducir costos de operación. Pero estos conocimientos pueden llegar más allá de solo resolver o ayudar con situaciones internas de una empresa.

Es así como una tecnología que se desarrolló como solución específica a un usuario, puede ser una oportunidad de negocio que se puede ofrecer a miles de usuarios, como respuesta a situaciones similares para las cuales la tecnología fue inicialmente desarrollada.

Debido a que situaciones de trabajo, en las que una misma tecnología desarrollada es aplicable, son similares, muy probablemente nunca serán totalmente iguales. Las soluciones desarrolladas deben cumplir con ciertas generalidades y ofrecer límites y condiciones para las cuales están certificadas sus aplicaciones, para que de esta forma el usuario las adapte a sus necesidades.

Como consecuencia, existen sistemas de verificación y control que garantizan que un producto desarrollado puede o no cumplir determinadas condiciones generalizadas. Estos sistemas de verificación y control, más conocidos como sistemas de pruebas, son usados por los desarrolladores y los usuarios; los primeros con el objetivo de garantizar y ofrecer unas características de un producto; y los segundos hacen uso de estos sistemas de pruebas para controlar la calidad y estar seguros de que un determinado producto puede suplir las necesidades de una situación.

Para este caso en particular, los sellos hidráulicos, que en su momento solo debían garantizar que un fluido no se fugara de una unión de elementos, hoy en día deben cumplir funciones adicionales a las de solo sellar hidráulicamente, también deben soportar presiones, ambientes agresivos, fuerzas de compresión, entre otras condiciones que una situación específica requerirá.

Por ende, al ofrecer un producto, un sello hidráulico para uniones bridadas en este caso, se debe garantizar como mínimo que pueda soportar las fuerzas de compresión entre las bridas que conforman el sellado y soportar la presión de trabajo del fluido interno; y como capacidades adicionales temperaturas críticas de operación, resistencia química, aislamiento eléctrico, entre otras en aplicaciones más específicas.

Disponer de un banco de pruebas hidrostáticas de manejo y construcción propia, así como procedimientos de pruebas basados en normas y estándares internacionales, permite a una empresa de desarrollo de tecnología en sellos hidráulicos realizar un control exhaustivo en sus productos, controlando y analizando las variables de mayor interés para un producto en específico, a la vez que realizar modificaciones que se adapten mejor a su forma de trabajo.

Ya que en una unión bridada con sello hidráulico intervienen muchos factores críticos, es necesario centrar la atención en aquellos que pueden ser generales para todos los casos y que representen los efectos de mayor impacto, los cuales una vez se comprueben y conozca su comportamiento en un determinado producto, permitirá que este último pueda ser sometido a otros factores de menor impacto pero de importancia para calidad, eficiencia y eficacia de un producto final.

Los procedimientos de pruebas hidrostáticas desarrollados en este proyecto, toman como base las recomendaciones y estándares internacionales que hacen referencia a sellos hidráulicos, uniones bridadas y tuberías para transporte de fluidos, orientándolos a registrar el comportamiento de nuevos diseños y nuevos materiales con el fin de que sean competitivos y fiables en la industria de sellos hidráulicos.

Para el usuario final es importante tener certeza de que el producto a utilizar satisface sus necesidades. El sistema de pruebas aprovecha las herramientas tecnológicas para compartir con el usuario los resultados obtenidos en las distintas pruebas realizadas sobre los sellos fabricados, y adicionalmente ofrecer soporte sobre el control de calidad y desempeño de diseños externos a la empresa.

## 1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad la industria petroquímica es una de las más grandes a nivel mundial, además de ser el principal eje funcional del planeta. Por esta razón la industria presta cada vez más atención a un mejoramiento continuo, para de esta manera aprovechar totalmente cada recurso disponible y disminuir cada vez más sus costos de operación.

Uno de los procesos más críticos en la industria petroquímica es el transporte de la materia prima (Crudo) y sus respectivos derivados. Este campo representa una alta inversión anualmente como concepto solo de mantenimiento, principalmente los costos de mantenimiento correctivo. En este caso, son críticos los nodos de unión de las tuberías de transporte, con problemas de fallo en los sellos, ya sea por desgaste o fallo total, resultando en pérdidas económicas considerables, puesto que las líneas de transporte deben ser interrumpidas. Es por esta razón que la industria dedica grandes esfuerzos a la implementación de nuevos tipos de sellos hidráulicos que sean más confiables y efectivos en su función.

Una nueva preocupación de las industrias en general, es el desarrollo de productos que no dependan de fuentes no renovables (Agroindustria), y la industria petroquímica no es ajena a esta tendencia; al ser esta industria tan competitiva en la actualidad, el avance e inversión tecnológica presente en el campo de sellos hidráulicos está en constante cambio y evolución, investigando y desarrollando diseños y materiales que puedan suplir las necesidades de la industria petroquímica, con mejores resultados tanto funcionales como económicos, para de esta manera lograr que el sello hidráulico no sea el elemento crítico. La introducción de nuevos desarrollos de sellos hidráulicos en la industria, requiere también el desarrollo de simulaciones que permitan comprobar su funcionalidad antes de ser utilizados en la aplicación real, debido a que el fallo de un solo sello hidráulico puede representar millonarias pérdidas.

DIACOR S.A.S., es una empresa de ingeniería de corrosión enfocada al sector energético. DIACOR, en función de su compromiso social, presta apoyo tecnológico e intelectual a grupos de investigación y organizaciones de interés en el campo. De esta manera, DIACOR desarrolla y patrocina internamente proyectos investigativos y prácticos que sirven de apoyo a entes con un interés común, como lo son Grupos de investigación (e.g. Grupo de Investigación en Polímeros y Grupo de Investigaciones en catálisis de la UIS), organizaciones pertenecientes al campo de acción (e.g. Corporación para la Investigación de la Corrosión – CIC) entre otros.

En el desarrollo de algunos proyectos de DIACOR y sus organismos asociados, se encuentran los diseños de nuevos sellos hidráulicos que se pretenden comercializar en la industria del transporte de hidrocarburos, así como también prestar apoyo en las instalaciones de campo.

## **2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA**

Uno de los problemas para la industria petroquímica y que representa un gran porcentaje de sus costos de operación es el mantenimiento de las líneas de transporte, puesto que una falla en estas conlleva millonarias pérdidas.

El punto crítico de las líneas de transporte se presenta en las uniones de las tuberías, y más específicamente en los sellos hidráulicos que deberían garantizar un sellado perfecto, manteniendo la presión y el fluido dentro de la tubería; además de esto, algunos sellos hidráulicos deben también cumplir la función de aislante eléctrico para sistemas de protección catódica en las tuberías. Es por esta razón que los sellos a utilizar deben ser de alta calidad y confiabilidad, para así garantizar que el sistema funcionará sin inconvenientes.

Los sellos hidráulicos que se utilizan hoy en día en la industria, pueden ser fabricados en distintas plantas alrededor del mundo, pertenecientes a un mismo fabricante, cada una con materias primas diferentes y probablemente con características diferentes, esto se verá reflejado en las características finales del sello, lo cual podría terminar en tener dos empaques de la misma referencia, del mismo fabricante, con características físicas y químicas diferentes. De la misma manera, la constante evolución en el campo de los sellos hidráulicos, presenta regularmente nuevos diseños y nuevos materiales a la industria petroquímica.

Este tipo de circunstancias, lleva a que el consumidor final, necesite tener la certeza de que los sellos hidráulicos a utilizar en su campo de aplicación real, puedan cumplir con sus requerimientos, y no presenten fallas en el futuro, o por lo menos se pueda predecir cuándo fallará, y se pueda implementar un buen plan de mantenimiento. De esta manera, es posible verificar la calidad de un lote de sellos hidráulicos adquiridos, así como realizar pruebas a nuevos desarrollos de la industria de sellos hidráulicos para garantizar que es funcional en una aplicación específica.

Dicho esto, es necesario para la industria, y para los entes de desarrollo, contar con un dispositivo capaz de realizar pruebas sobre los sellos hidráulicos que garanticen su integridad mecánica, y su confiabilidad bajo determinadas condiciones de trabajo.

Así, un sistema que permita realizar las pruebas de simulación de trabajo necesarias para determinada aplicación permitirá rápidamente conocer si un determinado diseño, o un determinado lote, es adecuado para una situación particular.

De la misma manera, entes de investigación relacionados a la aplicación, que siguiendo la tendencia mundial, han desarrollado materiales poliméricos compuestos con recursos no renovables, aplicados a sellos hidráulicos, tienen la necesidad de realizar pruebas de análisis que permitan, verificar que un nuevo material desarrollado cumpla la función de sello hidráulico, bajo las condiciones de trabajo en campo, al igual que pueda también cumplir la función de aislante eléctrico para sistemas de protección catódica.

### **3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y establecer pruebas hidrostáticas que permitan evaluar el desempeño de nuevos diseños de sellos hidráulicos y diseños comerciales bajo condiciones de operación reales, controlando las variables de capacidad de sellado y confinamiento de la presión validando los resultados con ayuda del diseño y construcción de un banco de pruebas hidrostáticas

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar pruebas hidrostáticas para nuevos diseños con nuevos materiales de sellos hidráulicos controlando su capacidad de mantener una presión de hasta 7.000 Psi, según la aplicación, monitoreando y registrando la presión y temperatura del sistema durante el transcurso de desarrollo de la prueba por medio de una interfaz Arduino, transductores de presión y sensores de temperatura, con el fin de caracterizar las variables de capacidad de sellado y capacidad de mantener la presión hidrostática, validando los resultados con diseños comerciales certificados
  
- Desarrollar y redactar un manual de apoyo para valorar los resultados obtenidos en pruebas con nuevos diseños de sellos hidráulicos para bridas RF y RTJ Class 150, Class 300, Class 400 y Class 600, a través de la comprobación y comparación del desempeño de sellos comerciales actuales registrando el comportamiento de la presión del sistema y goteo del mismo durante el desarrollo de la prueba con ayuda de una interfaz de adquisición de datos y sensores de presión y temperatura, con el fin de caracterizar el nuevo diseño y material del sello hidrostático en prueba

- Diseñar y construir el sistema que permita realizar las pruebas hidrostáticas en los sellos hidráulicos a evaluar, ofreciendo flexibilidad para ser adaptado a pruebas de otros elementos brindando presión y control de la misma, y con la posibilidad de utilizar distintos fluidos de prueba

## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1 PRUEBA HIDROSTÁTICA**

Una prueba hidrostática es un procedimiento que regularmente se realiza a un contenedor destinado a fluidos gaseosos y/o líquidos, con el fin de verificar su capacidad de soportar los esfuerzos a los cuales estará sometido dicho contenedor y los componentes presentes en su respectivo montaje, así como su hermeticidad. También es posible determinar las posibles fugas presentes en el contenedor sobre el cuál se está realizando la prueba.

Estas prácticas son realizadas a recipientes y elementos regidos por la norma ASME Boiler Pressure Vessel Code, en la cual se especifican todas las características de estas partes, y específicamente en la Sección 8 se hace referencia a la forma de realizar pruebas hidrostáticas a este tipo de recipientes, así como caracterizarlos según sus capacidades de presión.

Durante una prueba hidrostática existen distintos factores que pueden afectar su resultado, entre estos están:

- Temperatura de prueba
- Esfuerzos sobre el recipiente en prueba por los apoyos del mismo
- Corrosión de los elementos en prueba
- Montaje de los elementos
- Calidad de los sellos

### **4.2 BRIDAS PARA TUBERÍAS**

Una brida es un elemento estructural que generalmente se usa como unión de dos componentes diferentes. Las bridas son usadas para realizar uniones entre tramos de tuberías de transporte de fluidos, aunque su uso no está limitado a tuberías, pues también se puede encontrar en tanques de almacenamiento, calderas, generadores, entre otros.

En resumen, su aplicación es tener una unión removible de forma sencilla entre dos elementos. Y es esto lo que las hace tan populares, gracias a que no es necesario tener los elementos soldados entre sí, o unidos con sistemas de rosca u otro sistema complicado de ensamblar. Puesto que para unir un par de bridas solo es necesario que se encuentren frente a frente, no se necesario disponer de grandes espacios para realizar la unión ni movimientos exagerados de los elementos a unir.

En medio de las bridas, se asienta un elemento llamado sello, el cual es presionado en medio de un par de bridas, con el fin de deformarse y cubrir las imperfecciones en las caras de las bridas, evitando así que el fluido en el interior de las bridas salga de estas.

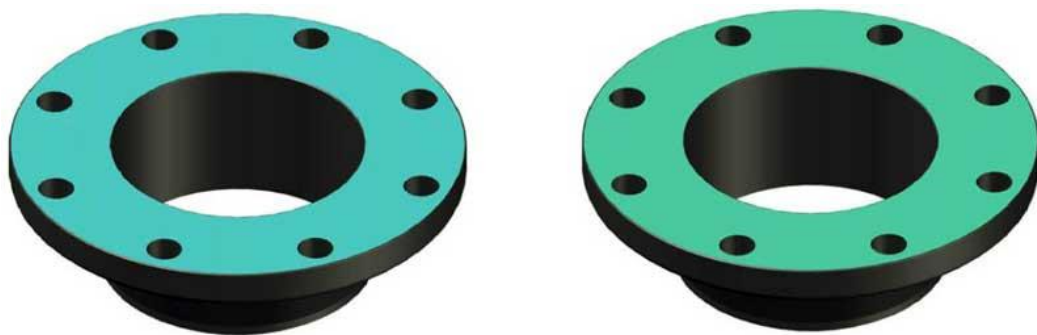
Existen distintos tipos de bridas, las cuales se pueden clasificar de distintas formas: tipo de cara, clase (Class), tipo de unión a la tubería, etc. Las bridas en las cuales se centra este documento son las regidas por la norma ASME B16.5.

#### 4.2.1 Tipo de cara

##### ➤ Bidas Flat Face (FF)

Este tipo de bridas, también conocidas como bridas de cara plana, generalmente están hechas de materiales frágiles. El sello que se asienta en sus cara es totalmente plano, y puede ser tipo E (los pernos de unión atraviesan el sello) o tipo F, lo pernos de unión rodean el sello.

Figura 1. Brida FF

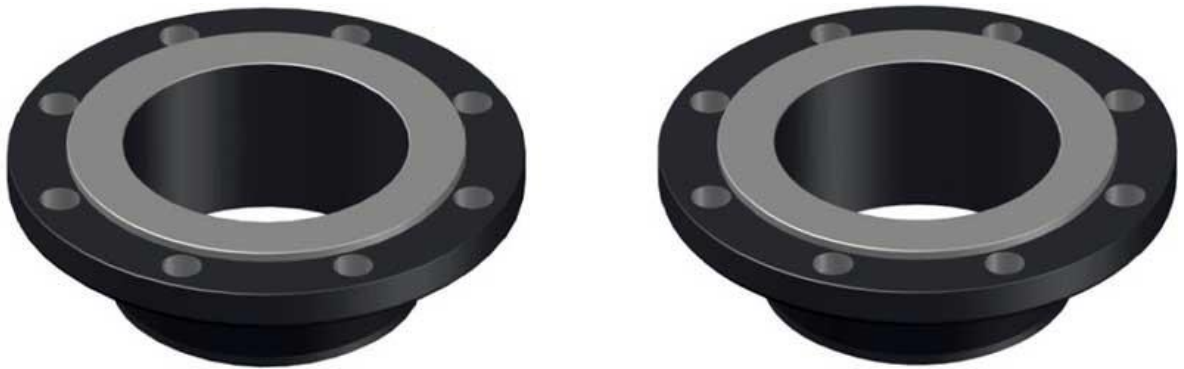


Fuente: Estan Pipe Fitting

➤ **Bridas Raised Face (RF)**

Conocidas como bridas de cara alzada o levantada, son de las más usadas en la industria, el hecho de tener un resalte concéntrico en su centro donde se apoya el sello, permite que se concentre más presión en una menor área, presionando más fácilmente el sello sobre las caras de las bridas.

Figura 2. Brida RF



Fuente: Estan Pipe Fitting

➤ **Bridas Ring Type Joint (RTJ)**

Se suelen conocer con bridas de anillo o de unión anillada. Estas bridas poseen un “canal” circular en su cara, sobre el cuál un sello en forma de anillo encaja, esto se usa con el fin de realizar un “sellado al primer contacto”.

Figura 3. Bridas RTJ



Fuente: Estan Pipe Fitting

➤ **Otros tipos de bridas**

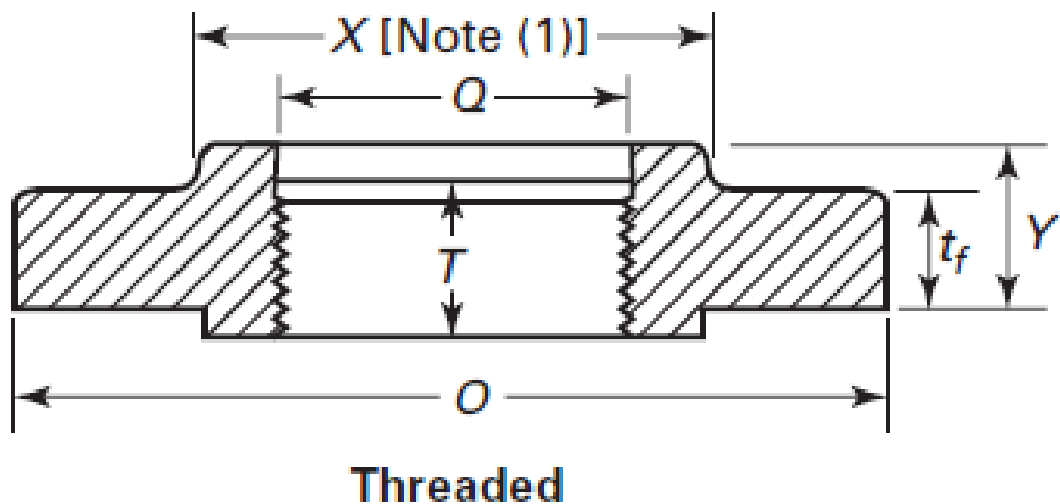
Entre las bridas disponibles en la industria, existen dos configuraciones que se han abierto paso y son comúnmente usadas. Estas son las conocidas macho – hembra y las Ranura – lengüeta, su diseño es muy similar, contrario a las bridas FF, RF y RTJ, en un par que hace la unión, ambas bridas son diferentes, una de ella posee un tipo de canal o ranura, y la otra un resalto que encaja con este canal.

**4.2.2 Tipos de unión a la tubería** Las bridas, también pueden ser clasificadas según el tipo de unión a la tubería o elemento en el que se encuentra. Las posibilidades varían desde bridas soldadas, bridas roscadas, hasta bridas que se deslizan a través de la tubería.

➤ **Bridas Roscadas**

Estas bridas poseen una rosca hembra en su lado contrario a la cara de asiento del sello, con la cual se pueden roscar fácilmente a tuberías o secciones de estas.

Figura 4. Brida roscada

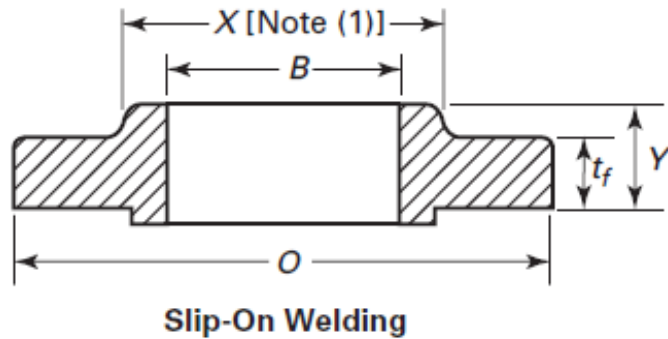


Fuente: ASME B16.5

➤ **Bridas Slip On**

Conocidas también como bridas deslizantes, estas como su nombre lo indica, se deslizan sobre la tubería y son soldadas en el extremo del mismo. Se consideran unos de los montajes más sencillos.

Figura 5. Brida Slip On

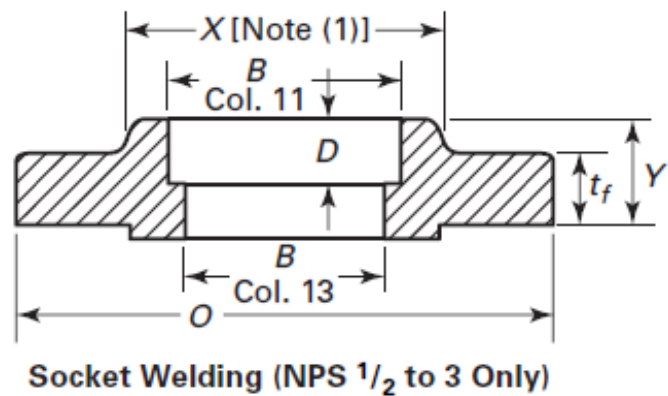


Fuente: ASME B16.5

➤ **Bridas Socket Welding**

Poseen un asiento para soldar (socket welding), en el cual el tubo se recuesta después de ser introducido en el agujero de la brida. Estas bridas permiten que la tubería mantenga una sección constante en el sector de la unión a la brida.

Figura 6. Brida Socket Welding

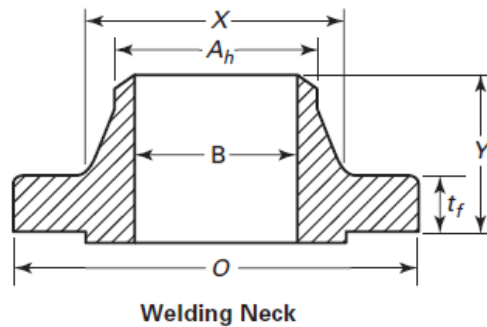


Fuente: ASME B16.5

➤ **Bridas welding neck**

Este tipo de bridas, posee un cuello notorio que es soldado a tope con la tubería a la cual se une. Al ser del mismo diámetro, tubería y cuello de la brida, se obtiene una sección parcialmente constante o de una transición suave, entre la tubería y la unión.

Figura 7. Brida welding neck

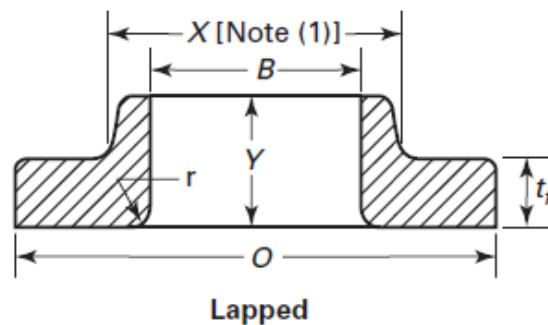


Fuente: ASME B16.5

➤ **Bridas Lap Joint**

Son unas bridas para aplicaciones muy particulares. Con este tipo de bridas, solamente la tubería está en contacto con el fluido, ya que las bridas son deslizadas sobre una tubería con un tope al final, el cual es empujado por las bridas uniendo las dos secciones de tubería.

Figura 8. Brida Lap Joint

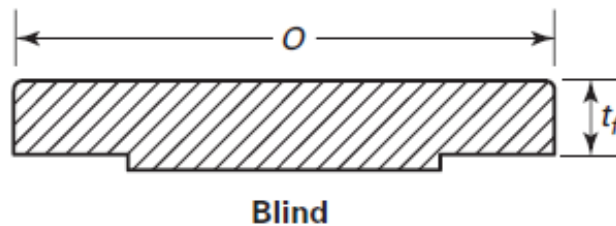


Fuente: ASME B16.5

### ➤ Bridas Blind

Conocidas como bridas ciegas. Este tipo de bridas son solo un disco con los agujeros de los pernos que le permiten unirse a otra. Son usadas para bloquear una línea y no permitir el paso del fluido.

Figura 9. Brida blind



Fuente: ASME B16.5

**4.2.3 Class de las bridas** Las clases o Class, determinan de cierta manera la presión que la brida es capaz de soportar. Esta clasificación fue realizada exclusivamente por la norma ASME y determina un máximo de presión, en función de la temperatura, que el tipo de Class de la brida puede manejar. Los tipos de Class disponibles son 150, 300, 400, 600, 900, 1500 y 2500. A medida que el número va creciendo, también lo hace la presión que es capaz de manejar la brida, así como la robustez y tamaño de la brida.

### 4.3 SELLOS HIDRÁULICOS PARA BRIDAS

Los sellos hidráulicos son elementos que se instalan en medio de una unión bridada que se deforman debido a la fuerza de compresión de las bridas para llenar los intersticios de las irregularidades de las caras de las bridas. Si fuese posible tener caras de las bridas totalmente lisas y sin imperfecciones, no habría necesidad de usar sellos hidráulicos.

Estos sellos se encuentran en la industria fabricados con distintos materiales, los cuales se adaptan a situaciones particulares. En caso de transportar por una línea

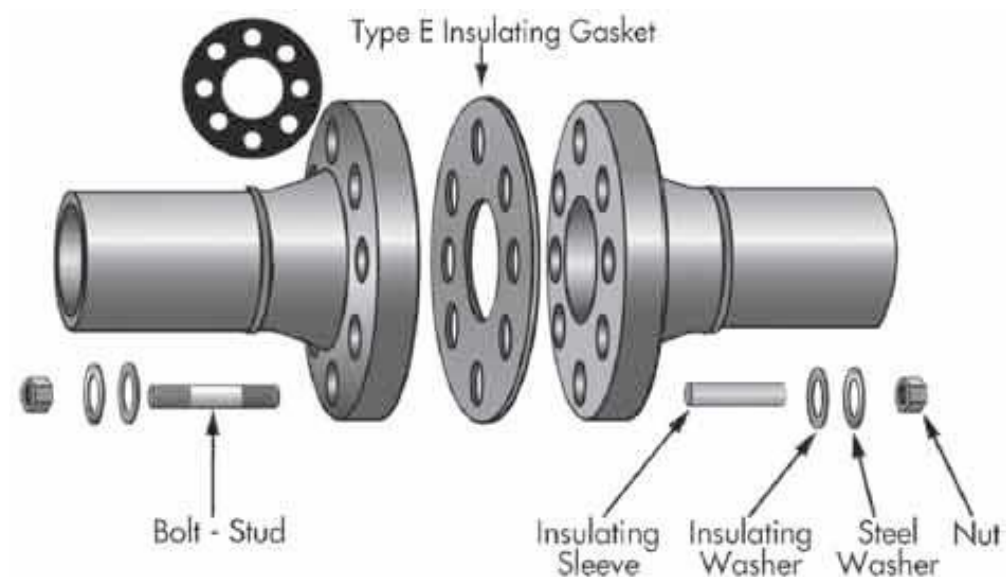
con uniones bridadas, fluidos a altas temperaturas, es necesario disponer de sellos capaces de soportar las condiciones de temperatura de la operación. Igualmente existen gran cantidad de opciones de sellos metálicos, que funcionan bastante bien, pero se convierten en un problema en el momento que es necesario realizar aislamientos de conducción eléctrica entre las bridas. Esto se necesita en ocasiones en que uno de los lados de la unión bridada está siendo tratado por sistemas de protección catódica para evitar los procesos de corrosión en el sistema. Por ello existen ofertas de sellos en materiales no metálicos no conductores.

Es posible encontrar infinidad de sellos hidráulicos, de infinitas formas, materiales, colores y demás características. Se describirán solo tres tipos, los cuales competen el desarrollo de este documento.

### ➤ **Empaques tipo E**

Estos empaques son atravesados por los pernos de apriete en cuanto son ensamblados, pueden ser usados en bridas FF o RF.

Figura 10. Sello tipo E

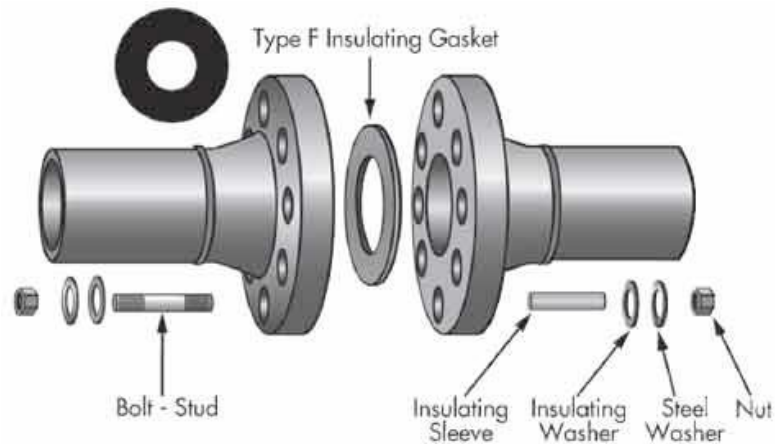


Fuente: Petunia International

➤ **Empaque tipo F**

Son empaques que no poseen agujeros para los pernos, por tanto cuando son ensamblados, los pernos le rodean y sirven de guía para centrar el sello en su posición. Son usados en bridas RF.

Figura 11. Sello tipo F



Fuente: Petunia International

➤ **Empaques tipo Ring**

Son sellos diseñados específicamente para bridas RTJ. Existen en distintas formas, sección e infinidad de materiales.

Figura 12. Sellos tipo Ring



Fuente: Fluid Sealing Products

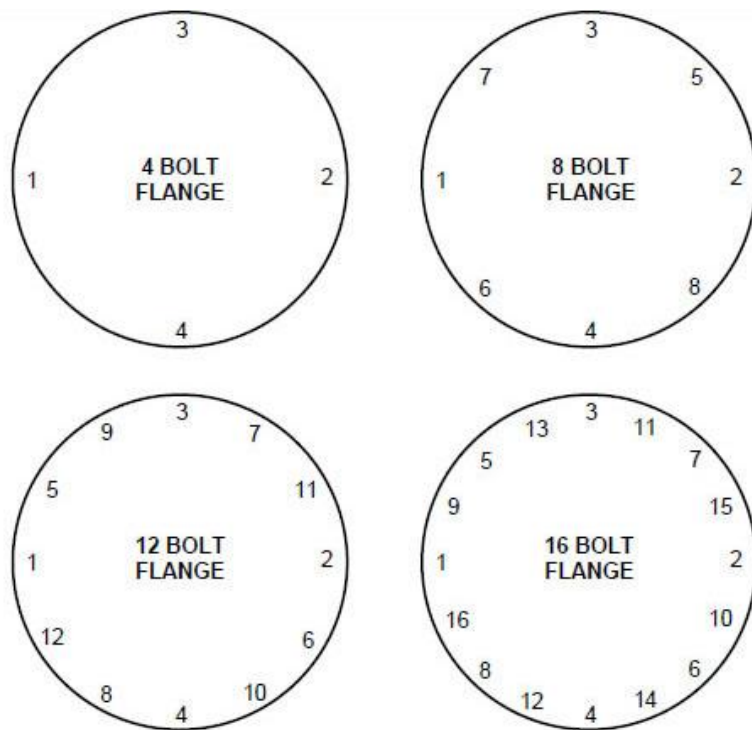
#### 4.4 TORQUE EN UNIONES BRIDADAS

El torque aplicado en los pernos de las uniones bridadas, permite tensionar los pernos de unión para que estos por medio de las tuercas (recostadas en arandelas) presionen las bridas entre sí para deformar el sello y que este cumpla su objetivo. Gran parte de los errores de una unión bridadada, provienen de la mala ejecución del proceso de montaje y apriete de los pernos.

Es necesario aplicar un torque mínimo que le permita al sello asentar sobre las caras de las bridas, pero también se deben tener en cuenta los límites superiores creados por la resistencia a la compresión del material de los sellos, y la resistencia a la tensión de los pernos, y la resistencia a la compresión de las bridas.

Uno de los aspectos más importantes al momento del montaje de un sello en una unión bridadada, es mantenerse y seguir el patrón de cruz en el apriete de los pernos.

Figura 13. Orden de apriete de los pernos



Fuente: Flowstar

Con el fin de no crear esfuerzos puntuales sobre el sello y distribuir uniformemente la carga sobre el mismo, los pernos deben ser apretados siguiendo los números en orden consecutivo, teniendo en cuenta el número asignado a cada perno, según el número de pernos de la brida a utilizar. Este patrón, es conocido como patrón en cruz.

Gran parte del éxito del funcionamiento de un sello hidráulico en una unión bridada depende del montaje. Esto incluye desde la limpieza de las superficies de las caras de las bridas, hasta el proceso de apriete siguiendo el patrón en cruz, según el número de pernos de la brida.

## 5. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS

El banco de pruebas hidrostáticas es la herramienta que permite aplicar los conceptos y procedimientos desarrollados para evaluar un determinado sello hidráulico. El diseño de este banco, llevó varias etapas y fue evolucionando hasta convertirse en el concepto que mejor se adaptó a las necesidades y finalmente fue construido y puesto en marcha. A continuación se presentan las etapas y condiciones que orientaron su diseño.

### 5.1 DISEÑO CONCEPTUAL

En primera medida, se determinaron los principales factores que en forma directa afectan el desempeño de un sello hidráulico. Las siguientes características fueron soportadas por aquellas principales explícitas en fichas técnicas de sellos comerciales y requerimientos de la empresa solicitante del banco de pruebas.

Figura 14. Ficha técnica Garlock BlueGard

<b>MEDIA</b>	
› Water	
› Aliphatic hydrocarbons	
› Oils	
› Gasoline	
<b>SPECIFICATIONS:</b>	
Min. Temperature:	-100 (°F)
Max. Temperature:	700 (°F)
Continuous Max:	400 (°F)
Max Pressure:	1000 (PSI)
Maximum PxT 1/16:	350,000 (°F x PSIG)
Maximum PxT 1/8:	250,000 (°F x PSIG)

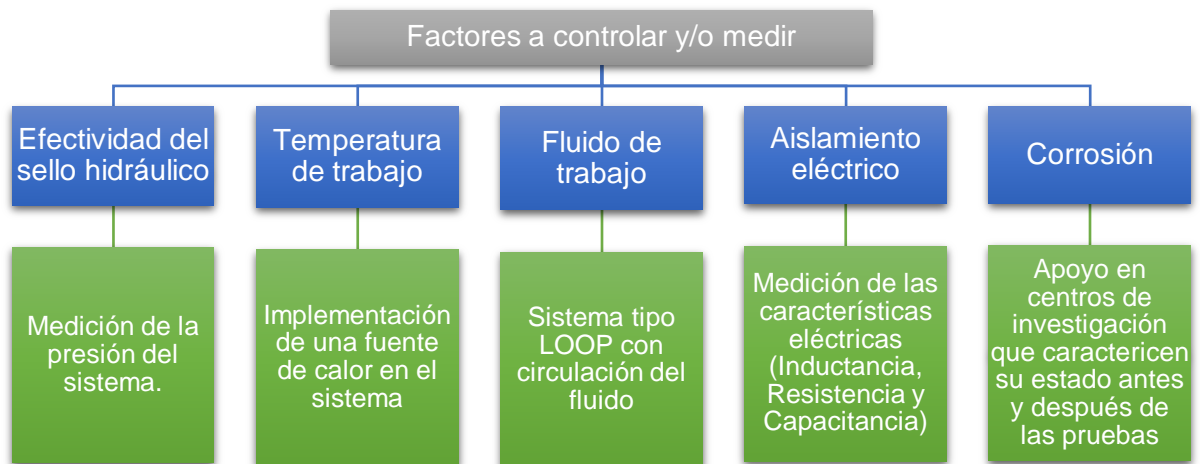
Fuente: EnPro Industries Inc

Figura 15. Ficha técnica US Pipe

Description	Maximum Service Temperature <sup>1,2</sup>		Uses <sup>3</sup>
	Water & Sewer °F	Air <sup>4</sup> °F	
<b>SBR</b> (Styrene Butadiene)	150	125	<b>Common:</b> Drinking Water, Sea Water, Sanitary Sewage, Reclaimed Water, Raw Water, Storm Water
<b>Nitrile (NBR)</b> (Acrylonitrile Butadiene)	150	125	<b>Common:</b> Hydrocarbons, Fats, Oils, Greases, Chemicals, Oils & Fluids, Refined Petroleum <b>Other Acceptable Services:</b> Drinking Water, Sanitary Sewage, Reclaimed Water, Raw Water, Storm Water
<b>Neoprene®</b> (Polychloroprene)	200	150	<b>Common:</b> Greasy Waste. <b>Other Acceptable Services:</b> Sea Water, Sanitary Sewage, Reclaimed Water, Raw Water, Storm Water
<b>EPDM</b> (Ethylene Propylene Diene Monomer)	212	150	<b>Common:</b> Alcohols, Dilute Acids, Dilute Alkalis, Ketones (MEK, Acetone), Vegetable Oil. <b>Other Acceptable Services:</b> Drinking Water, Sea Water, Sanitary Sewage, Reclaimed Water, Raw Water, Storm Water

Fuente: US Pipe

Figura 16. Factores de control y medición

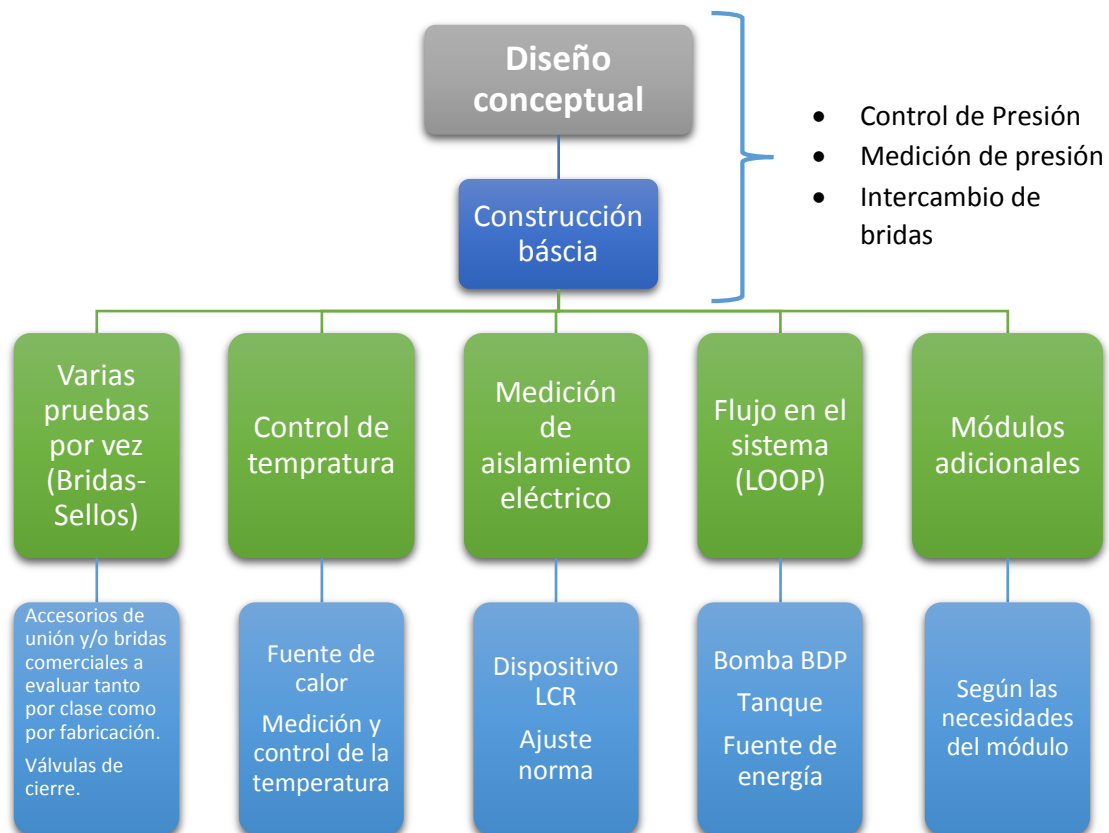


Con los factores identificados, y sus consecuencias respecto a su implementación, es posible notar que cada uno repercutirá en costos adicionales, por lo tanto, será necesario contar como primera medida con la característica más importante que

pueda definir un sello hidráulico. De esta manera el sistema a desarrollar, en su diseño más elemental, tendrá que permitir mantener y controlar una presión en las líneas sobre las cuales se está evaluando el sello hidráulico, garantizando que su función de sello se esté cumpliendo y que el fluido pueda ser confinado manteniendo la presión en el sistema.

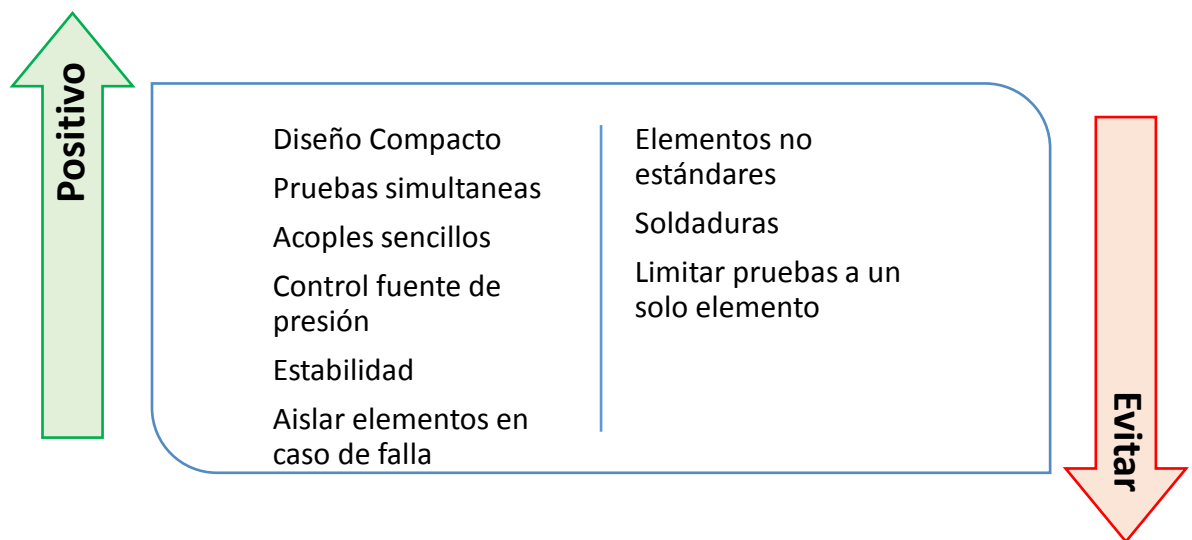
De esta manera, se plantea el desarrollo del sistema de pruebas en fases concretas que permitan ser organizadas y de esta manera ser consecuente con el proyecto de trabajo. Así, es como se origina el siguiente esquema que de manera jerárquica permite identificar y decidir sobre el proceso de ejecución, dicho esto, se puede apreciar que los módulos o facilidades adicionales no son condicionales entre sí y pueden ser implementados en cualquier punto del tiempo en el proyecto, siempre y cuando las fases de diseño conceptual y construcción básica estén desarrolladas.

Figura 17. Fases de desarrollo del banco de pruebas



**5.1.1 Bancos de pruebas hidrostáticas en la industria** Como un ejercicio de retroalimentación, se analizaron distintos equipos utilizados para realizar pruebas hidrostáticas en distintos tipos de industrias. Estas pruebas estudiadas, fueron aplicadas con objetivos diferentes entre sí, pero permitieron obtener un punto de referencia sobre los elementos que pueden aportar positivamente al banco de pruebas hidrostáticas. Así mismo, se tomaron en cuenta las configuraciones que pueden implicar un aspecto negativo en el sistema a construir. Ver anexo A.

Figura 18. Ventajas y desventajas de sistemas comunes



**5.1.2 Dimensiones de los elementos del banco de pruebas** Puesto que el objetivo principal es someter los sellos hidráulicos a las condiciones de trabajo críticas y extrapolar, en la medida de lo posible, los datos a otras configuraciones.

Se realizó un análisis sobre la presión ejercida debido al torque de apriete sobre un sello hidráulico plano tipo F para brida RF. Los torques de apriete recomendados para los pernos, fueron tomados de la ficha técnica de la empresa DIACOR para empaques en teflón (PTFE). Ver anexo B.

A partir de una tabla que permite obtener un valor aproximado de la compresión en un perno a partir del torque aplicado, se tomaron los valores de tensión en cada perno según el montaje de cada brida. Ver anexo C.

En la siguiente tabla, se muestran los datos utilizados de una forma organizada y clara para bridas RF C300:

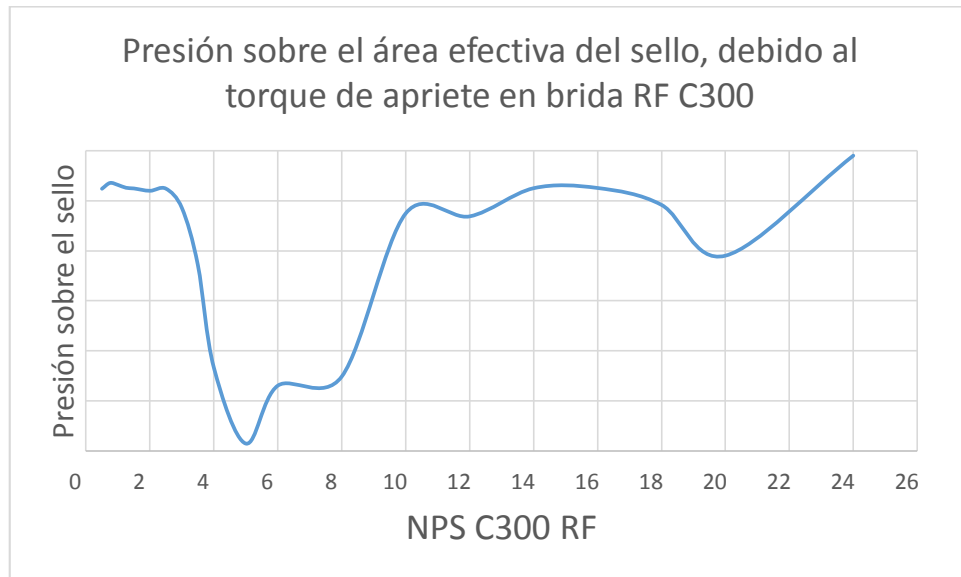
Tabla 1. Presión en sello debido al torque

NPS	DIÁMETRO INTERNO	DIÁMETRO EXTERNO	ÁREA EFECTIVA DEL SELLO	TORQUE RECOMENDADO	NÚMERO DE PERNOS	COMPRESIÓN DE CADA PERNO	PRESIÓN EN EL SELLO DEBIDO AL TORQUE
[IN]	[in]	[in]	[in <sup>2</sup> ]	[Lbf-ft]		[Lb]	[Psi]
1/2	0.84	1.38	0.94	21	4	2 646	11 241.21
3/4	1.06	1.69	1.36	38	4	3 863	11 356.64
1	1.31	2.00	1.79	50	4	5 075	11 317.50
1 1/4	1.66	2.50	2.74	77	4	7 727	11 261.09
1 1/2	1.91	2.88	3.65	113	4	10 260	11 246.81
2	2.38	3.62	5.84	81	8	8 181	11 200.40
2 1/2	2.88	4.12	6.82	106	8	9 581	11 243.17
3	3.50	5.00	10.01	150	8	13 590	10 856.99
3 1/2	4.00	5.50	11.19	150	8	13 590	9 714.15
4	4.50	6.19	14.19	150	8	13 590	7 662.23
5	5.56	7.31	17.69	150	8	13 590	6 146.15
6	6.62	8.50	22.33	150	12	13 590	7 304.68
8	8.62	10.62	30.22	240	12	18 855	7 486.57
10	10.75	12.75	36.91	368	16	24 795	10 747.23
12	12.75	15.00	49.04	533	16	32 760	10 688.79
14	14.00	16.25	53.46	489	20	30 074	11 251.68
16	16.00	18.50	67.74	684	20	38 126	11 256.52
18	18.00	21.00	91.89	750	24	41 805	10 918.52
20	20.00	23.00	101.32	750	24	41 805	9 902.84
24	24.00	27.25	130.82	1 164	24	64 881	11 903.21

$$Presión\ en\ el\ sello = \frac{\# \text{ pernos} * \text{Compresión de cada perno}}{\text{Área efectiva del sello}}$$

A continuación se presenta una gráfica relacionando la presión sobre cada sello con su diámetro nominal:

Figura 19. Presión sobre el sello vs NPS



Teniendo en cuenta el gráfico de la Figura 19, es posible notar que para los diámetros nominales de  $\frac{1}{2}$ " hasta  $3\frac{1}{2}$ ", y desde 10" hasta 24", el sello sufre un mayor esfuerzo de compresión debido al torque aplicado. Es así como se decidió trabajar con un diámetro nominal comprendido entre  $\frac{1}{2}$ " y  $3\frac{1}{2}$ "; se descartaron los diámetros más grandes debido a su poca practicidad en el manejo, además de su elevado coste.

Para decidir el tamaño más adecuado, de forma que sea versátil respecto a las clases de presión disponibles en el mercado se analizan las dimensiones que hacen referencia a la sección sobre la cual es soportado el sello; esto con el fin de determinar si es posible utilizar una misma medida, clase y tipo de brida para cubrir otras. Se analizaron desde los diámetros más pequeños disponibles hasta 3".

En cuanto a las bridas RTJ se encontró que los diámetros 1",  $1\frac{1}{4}$ ",  $1\frac{1}{2}$ ", cubren un mayor número de clases con una misma medida (Tabla 2). Es decir, que al usar una brida RTJ C1500 1" se pueden usar el mismo tipo de sello que se usaría desde la clase 300 hasta la clase 1500 en el mismo diámetro NPS, teniendo en cuenta únicamente las dimensiones. Con esta característica se podrían agrupar de la siguiente manera:

- RTJ Grupo 1: Class 150
- RTJ Grupo 2: Class 300, Class 400, Class 600, Class 900 y Class 1500
- RTJ Grupo 3: Class 2500

Tabla 2. Dimensiones agujeros bridas tipo RTJ - ASME B16.5

Class	GROOVE NUMBER (r)							
	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3
150	-	-	15	17	19	22	25	29
300	11	13	16	18	20	23	26	31
400	11	13	16	18	20	23	26	31
600	11	13	16	18	20	23	26	31
900	12	14	16	18	20	24	27	31
1500	12	14	16	18	20	24	27	35
2500	13	16	18	21	23	26	28	32

Fuente: ASME B16.5

Tomando como referencia los diámetros escogidos en el análisis de las medidas de las bridas tipo RTJ, se compararon las correspondientes en las bridas tipo RF (Tabla 3). Se pudo notar que en los tres diámetros comparados los resultados son los mismos, y las dimensiones sobre las cuales se apoya el sello son iguales si se agruparán las cases de la siguiente manera:

- RF Grupo 1: Class 150
- RF Grupo 2: Class 300, Class 400 y Class 600
- RF Grupo 3: Class 900 y Class 1500
- RF Grupo 4: Class 2500

Por lo tanto, el sistema de pruebas se construyó en un diámetro NPS de 1", dejando como opción a usar también los diámetros de 1 ¼" o 1 ½", los cuales permiten tener una configuración flexible y práctica, en la que se tendrán la menor cantidad de bridas para uso, y la mayor cantidad de posibilidades de escenario, así como la simulación de las situaciones más críticas. El diámetro específico a usar, sin embargo, dependerá de situaciones puntuales.

FIGURA 20. Dimensiones Bridas RF – ASME B16.5

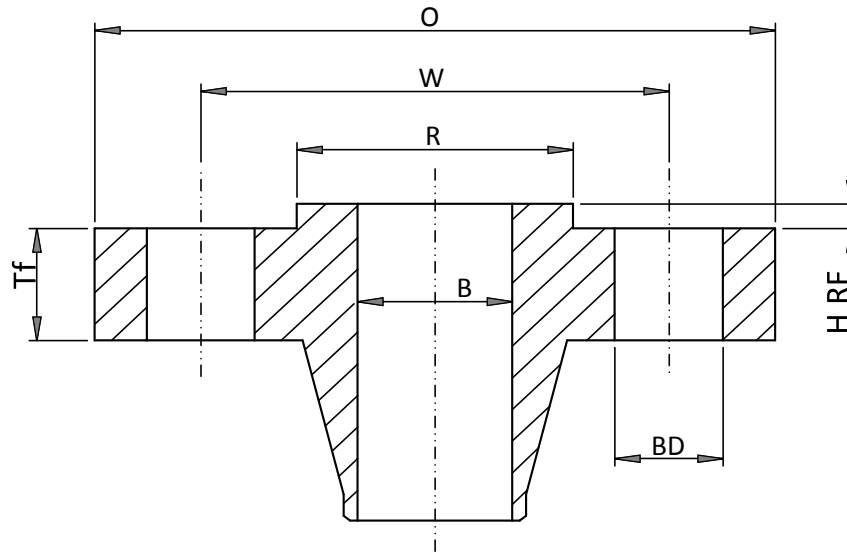


Tabla 3. Dimensiones Brida tipo RF - ASME B16.5

	Class	O	B	W	# Bolts	BD	Tf	R	H RF
1	150	110	26.6	79.4	4	5/8	12.7	50.8	2
	300	125	26.6	88.9	4	3/4	15.9	50.8	2
	400	125	*	88.9	4	3/4	17.5	50.8	7
	600	125	*	88.9	4	3/4	17.5	50.8	7
	900	150	*	101.6	4	1	28.6	50.8	7
	1500	150	*	101.6	4	1	28.6	50.8	7
	2500	160	*	108.0	4	1	35.0	50.8	7
1 1/4	150	115	35.1	88.9	4	5/8	14.3	63.5	2
	300	135	35.1	98.4	4	3/4	17.5	63.5	2
	400	135	*	98.4	4	3/4	20.7	63.5	7
	600	135	*	98.4	4	3/4	20.7	63.5	7
	900	160	*	111.1	4	1	28.6	63.5	7
	1500	160	*	111.1	4	1	28.6	63.5	7
	2500	185	*	130.2	4	1 1/8	38.1	63.5	7
1 1/2	150	125	40,9	98,4	4	5/8	15,9	73,0	2
	300	155	40,9	114,3	4	7/8	19.1	73,0	2
	400	155	*	114,3	4	7/8	22.3	73,0	7
	600	155	*	114,3	4	7/8	22.3	73,0	7
	900	180	*	123,8	4	1 1/8	31.8	73,0	7
	1500	180	*	123,8	4	1 1/8	31.8	73,0	7
	2500	205	*	146,0	4	1 1/4	44.5	73,0	7

Dimensiones en centímetros

\*Especificada por el comprador

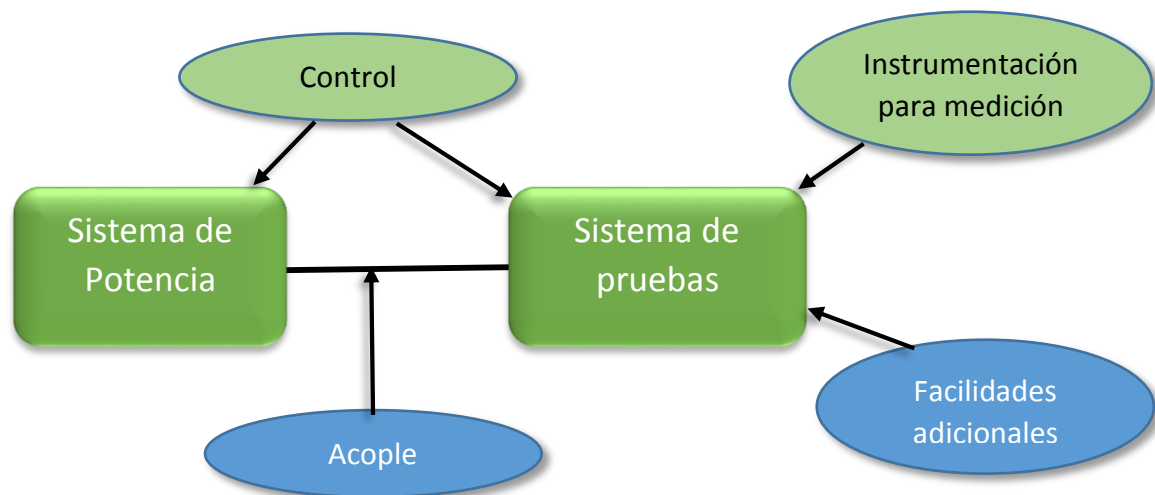
Fuente: ASME B16.5 – 2009

## 5.2 DISEÑO GENERAL Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

A partir de los análisis y resultados anteriores, se decidió implementar un diseño esquemático general del sistema de pruebas que representa el concepto general, separándolo en dos grupos: principales y secundarios:

- Sistema de potencia
  - Sistema de pruebas
  - Instrumentación y control
- } Principales  
Esenciales para el funcionamiento
- Facilidades adicionales
  - Acople
- } Secundarios  
Opcionales. No condicionan el funcionamiento

Figura 21. Esquema general del sistema



Basándose en los requerimientos de los clientes de Diacor SAS y su experiencia en la industria, el tipo de brida a utilizar será RF y RTJ, las cuales representan las aplicaciones más versátiles y comunes en la industria. Las demás características generales del sistema son las siguientes:

Tipo de brida: RF/RTJ

Diámetro nominal (NPS): 1" En caso de ser necesario hasta 1 ½"

**5.2.1 Sistema de potencia** Teniendo en cuenta las premisas iniciales y la experiencia anotada de sistemas disponibles en la industria, se tomó siempre el ideal de realizar un sistema sencillo, práctico y eficiente.

El sistema de potencia, debe ser capaz de suministrar la presión necesaria al sistema, la cual expondrá al sello hidráulico a condiciones que permitirán evaluar su desempeño. La presión que debe ser capaz de brindar este sistema de potencia, está comprendida entre los 0 Psi y 7.000 Psi. Adicionalmente, el sistema debe permitir aumentar la presión de forma controlada, con pasos de no más de 50 Psi. Como primera opción se realizarán las pruebas a los sellos hidráulicos, sometiéndolos a un ambiente de aceite hidráulico.

Las opciones analizadas como sistema de potencia, incluían bombas de desplazamiento positivo. Este tipo de bombas permiten obtener flujos variables y presiones considerablemente altas. Su principal problema para este proyecto, es que necesitan tener una circulación de fluido. Es necesario disponer de un tanque, conexiones eléctricas, controles constantes, entre otras disposiciones. Estas características, alejan a las bombas de desplazamiento positivo del ideal planteado de sencillez y practicidad.

Debido a lo anterior, se decidió utilizar una bomba manual de cilindro. Este tipo de bomba, utiliza el mismo concepto de una bomba de desplazamiento positivo, con la diferencia de que su energía proviene de un operario. Además, son de tamaños pequeños, montaje y operación sencillos, y costos menores respecto a una bomba de desplazamiento positivo. Puesto que su funcionamiento es manual, el aumento de presión estará sujeto al desplazamiento del pistón de la bomba que realice el operario. Su desventaja, es que la presión no puede ser bajada gradualmente, y no es posible controlar con solo la bomba la disminución de la presión.

Por lo tanto, la bomba elegida para el sistema de potencia, es una bomba manual Enerpac, cuyas características se presentan a continuación:

Figura 22. Bomba manual Enerpac P-39



Fuente: Enerpac

➤ **Bomba Enerpac P-39**

- ✓ Bomba de una etapa
- ✓ Presión nominal de Trabajo: 10.000 Psi (700 Bar)
- ✓ Cantidad de Aceite utilizable: 770 cm<sup>3</sup>
- ✓ Desplazamiento de aceite por carrera: 2,46 cm<sup>3</sup>
- ✓ Fuerza máxima de bombeo: 39 Kgf
- ✓ Válvula de despresurización integrada
- ✓ Dimensiones: 46,4cm x 13,3cm x 12cm (Largo x Ancho x Alto)

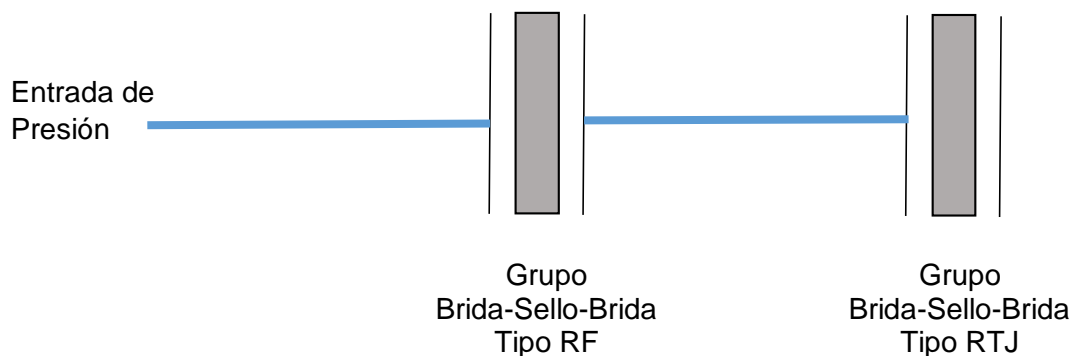
**5.2.2 Sistema de pruebas** El sistema de pruebas, comprende el montaje de los sellos hidráulicos a evaluar. Esto implica tener disponibilidad de bridas que permitan el montaje del o los sellos y evaluar su desempeño.

Este sistema pasó por distintas etapas y se propusieron distintas alternativas, las cuales fueron evolucionando hasta llegar al diseño que se consideró era la mejor opción para la necesidad inmediata. Se presentarán algunas de las fases principales que tuvieron lugar antes de obtener el diseño final, con sus ventajas y desventajas que hicieron que fuesen descartadas.

➤ **Sistema de pruebas – Diseño #1**

Se diseñó el sistema de pruebas como un conjunto de 2 pares de bridas, un par de cada tipo (RF, RTJ) de las misma clase, teniendo el mismo conjunto para cada una de las clases que se desee verificar y analizar (Class 300, Class 400, Class 600, etc.), el esquema que representa lo propuesto es el siguiente:

Figura 23. Diseño #1



El diseño formulado exige tener a disposición todo el conjunto en cada tipo de clase (Class) que se desee trabajar, es decir se desean realizar análisis sobre Class 900 y Class 1500 es necesario contar con todo el juego completo para cada una, y de la misma manera para cada clase (Class) que se necesite.

Sumado a lo anterior el sistema presentado tiene un inconveniente, el cual ya se había podido notar en los diseños disponibles en la industria; una vez que uno de los sellos presenta una falla toda la prueba debe ser interrumpida, impidiendo así continuar con el estudio del otro sello.

Como configuración de montaje, intentando que el sistema fuese lo más flexible posible, se propuso utilizar bridas roscadas, de esta manera se tendría versatilidad total en el sistema, lográndose así realizar cualquier combinación de montaje, por ejemplo:

Tabla 4. Configuración de bridas en el sistema

Primer par de bridas*	Segundo par de bridas*
RF	RF
RF	RTJ
RTJ	RTJ
RF	-----
RTJ	-----

*\*Para cada montaje todos los pares de bridas deben ser de la misma Clase*

En vista de que el objetivo del sistema es poder realizar un estudio de los sellos hidráulicos usados en este tipo de montajes, todos los demás puntos y configuraciones deberían funcionar de la mejor manera posible para evitar la inversión de esfuerzos en su control y revisión. La utilización de bridas roscadas implica que cada vez que se necesite utilizar una configuración diferente a la ensamblada es necesario desenroscar las antiguas bridas y enroscar las nuevas bridas para lograr la configuración deseada, esto conlleva a invertir recursos en materiales y tiempo que garanticen una unión y sellado correcto entre la brida y el tubo que la soporta. Por esta razón, se descartó este tipo de diseño.

➤ **Sistema de pruebas – Diseño #2**

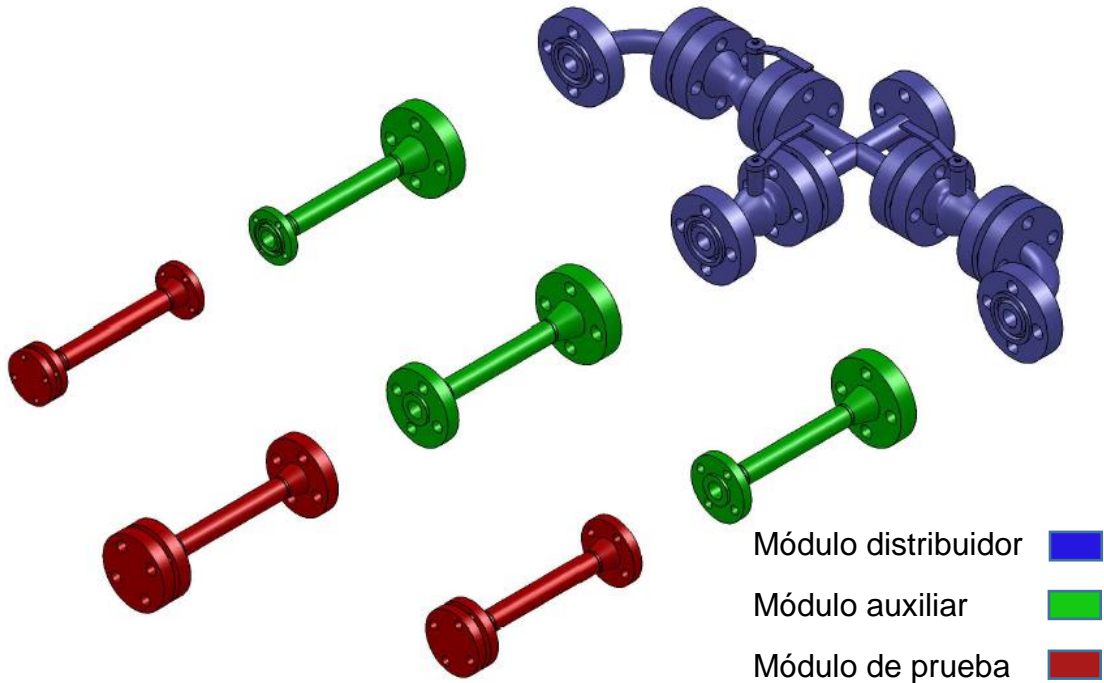
Con el fin de evitar generar posibles puntos de falla adicional y evitar invertir recursos en el intercambio de bridas, se obvió el uso de bridas roscadas y se utilizaron “cartuchos” de bridas soldadas a la tubería con las principales configuraciones que se consideren necesarias y prioritarias para analizar.

Teniendo en cuenta los puntos resaltados, se optó por modificar el diseño con el fin de corregir las observaciones y lograr optimizar los recursos de tiempo y dinero en sistema.

Se pensó en un módulo distribuidor construido en elementos Class 2500, con el fin de soportar desde las presiones más pequeñas hasta las más elevadas. Además,

este módulo distribuidor contenía tres válvulas que permitían aislar o incluir cada una de las tres líneas en cualquier momento.

Figura 24. Diseño #2



El módulo auxiliar, era un elemento de enlace entre el módulo distribuidor y el módulo de prueba. Este módulo auxiliar incluía una brida Class 2500 de unión al módulo distribuidor, irrelevante si fuese RF o RTJ, en un extremo, y en el otro extremo una brida RF o RTJ y Class según el sello que se fuese a evaluar.

Por último, el módulo de prueba, permitía probar uno o dos sellos por cada línea (máximo 6 por vez). Era necesario contar con una cantidad de módulos de prueba como tantas cantidad de pruebas de desearan realizar por vez, así como por cada tipo de brida escogida.

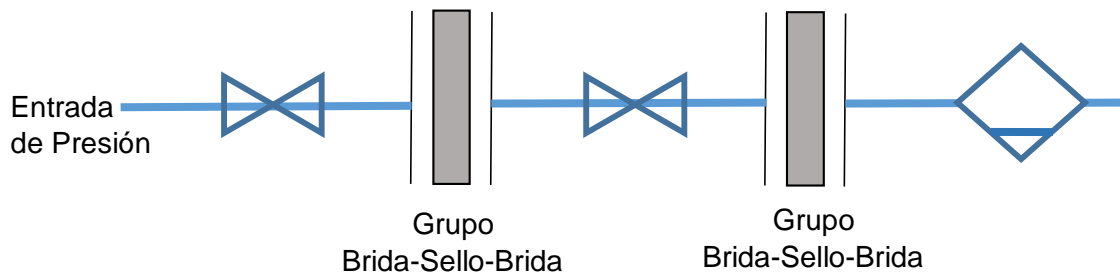
La ventaja de este diseño, era la posibilidad de aislar cada línea en caso de que un elemento fallara. Adicionalmente, era posible realizar a la vez pruebas de distintos tipos de sello de una misma Class conectados en líneas diferentes.

Este diseño, fue finalmente descartado debido a que era necesario tener una gran cantidad de elementos (módulos auxiliares y módulos de prueba) y al alto costo de sus elementos. Solo cada una de las válvulas del módulo distribuidor costaba \$3.000 dólares aproximadamente.

➤ **Sistema de pruebas – Diseño final**

Después de un ejercicio autocrítico y evaluador de la información obtenida, se rediseño el sistema de pruebas obteniendo el siguiente resultado:

Figura 25. Diseño final



El diseño final obtenido, es similar al diseño inicial. Posee dos válvulas que permiten que una vez se alcance la presión a la cual se va a realizar la prueba, ser cerradas y aislar el sistema manteniéndolo a la presión alcanzada, de esta forma es posible aislar la bomba y no mantenerla presurizada durante la prueba. Adicionalmente, se dispone de una válvula para poder purgar el sistema y evacuar el aire que se encuentre en el interior de las líneas antes de realizar la prueba. Se pudo comprobar que estas burbujas de aire en el interior de las líneas al iniciar una prueba, tienden a salir, y cuando lo hacen, se registra una baja de presión instantánea considerable. Ver anexo D.

Este diseño es versátil respecto a la cantidad de sellos a evaluar, es decir, si se desea evaluar un único sello, se puede prescindir de los elementos medios y se realiza el montaje de una única brida, o si se desean evaluar más de dos sellos, se pueden agregar tanto juegos de bridas como se desee, de tipos diferentes (RF o RTJ).

Figura 26. Diseño final - un sello

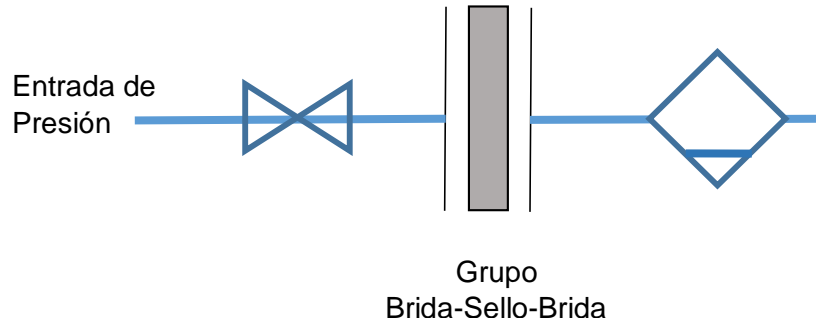
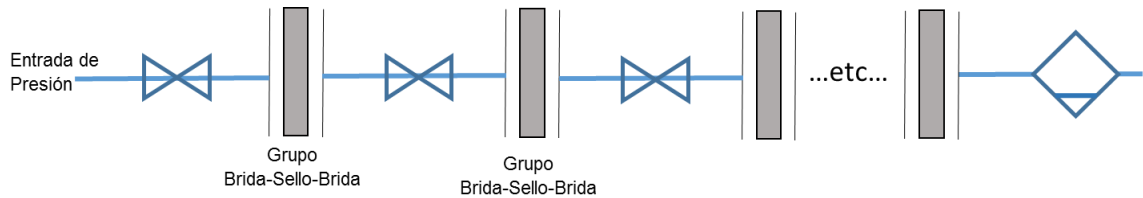
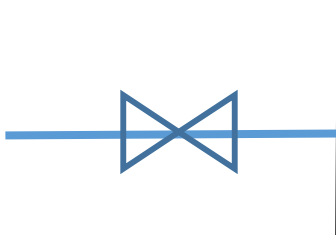


Figura 27. Diseño final - "n" sellos

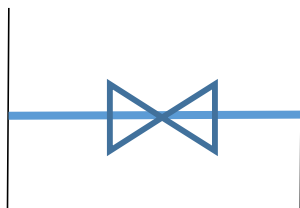
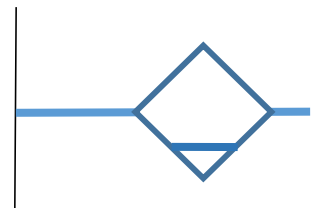


El diseño se compone de los siguientes elementos: (Ver anexo E)



**Línea de entrada:** Compuesta de un tramo al cual se acopla la salida del sistema de potencia. Le sigue una válvula para aislar la bomba una vez presurizado el sistema. A continuación se encuentra un brida sobre la cual se ubica el sello a evaluar.

**Línea de purga:** Incluye una brida al final de todo el sistema, que contiene el o uno de los sellos a evaluar. Continúa a una válvula de purga para sacar el aire en la línea antes de presurizarla.



**Línea intermedia:** Por cada uno de estos juegos adicionales, se puede incluir un sello adicional. Incluye una brida en cada extremo. En el medio, una válvula para aislar cada sello al momento de la prueba.

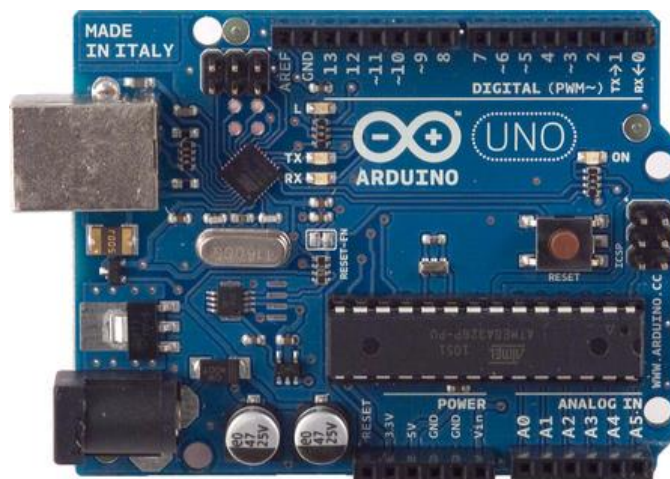
**5.2.3 Instrumentación y control** En esta sección se describirán los elementos utilizados para realizar el control, monitoreo y montaje de los sellos en el banco de pruebas, sin embargo en el capítulo 7, se hará una descripción detallada del control y adquisición de datos del sistema.

Las características principales que garantizan el desempeño de un sello hidráulico para bridas, es su capacidad de sellado. Esta se ve afectada por distintos factores, los principales son la presión interna del fluido, la temperatura y el montaje del sello.

➤ **Tarjeta de interfaz Arduino**

Se optó por utilizar la plataforma Arduino, debido a su bajo costo, versatilidad y confiabilidad. Aunque el registro de datos se realiza mediante un computador, algunos cálculos sencillos y decisiones programadas, fueron asignados a la tarjeta Arduino, dejando así mayor capacidad de procesamiento al computador.

Figura 28. Arduino UNO



Fuente: Arduino

Tabla 5. Características Arduino UNO

MICROCONTROLLER	ATMEGA328
Operating voltage	5V
Input voltage	7-12V
Input voltage (limits)	6-20V
Digital i/o pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog input pins	6
Dc current per i/o pin	40 mA
Dc current for 3.3v pin	50 mA
Flash memory	32 KB (ATmega328) - 0.5 KB used by bootloader
Sram	2 KB (ATmega328)
Eeprom	1 KB (ATmega328)
Clock speed	16 MHz
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

Fuente: Arduino

➤ **Sensor de presión**

El sensor de presión usado, es un transductor de presión de alta calidad, el cual convierte la presión de un fluido en una señal eléctrica análoga, que es leída por un sistema de conversión análogo digital.

Figura 29. Sensor de presión Wika A10



Fuente: Wika

➤ **Características:**

- ✓ Transmisor de Presión Wika A10
- ✓ Presión absoluta máxima: 14.500 Psi (1000 Bar)
- ✓ Señal de salida: 4-20 mA
- ✓ Tolerancia: +/- 2%
- ✓ Temperatura de Trabajo: -10 – 70 °C
- ✓ Conexión roscada ¼ NPT

### ➤ **Manómetro de glicerina**

Se dispuso de dos manómetros análogos, uno de 0-10.000 Psi y uno de 0-3000 Psi. Estos medidores permiten calibrar el sistema y controlar los datos entregados por el sistema digital. Igualmente, en caso de fallo o ausencia del sistema digital, se tiene un registro de los valores de presión en el sistema.

#### **Características:**

- ✓ Manómetro Glicerina 2.5" CV Enerpac
- ✓ Carátula: 2.5 "
- ✓ Tipo de conexión: Vertical ¼"
- ✓ Presión máxima: 10.000 Psi – 3.000 Psi

### ➤ **Sensor de temperatura**

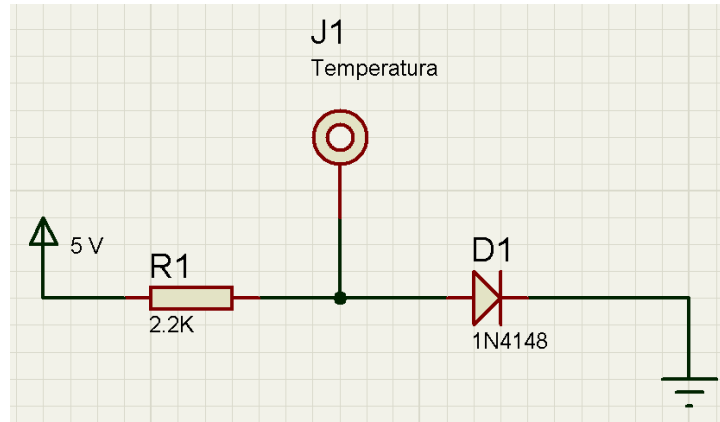
Se pudo constatar que los cambios de temperatura ambiente influyen de forma considerable en el sistema. Debido a que los elementos usados son pocos, y son rígidos, la expansión y compresión del fluido debido a la temperatura no afectan fácilmente a los elementos. Ver anexo D.

En vista de esto, es necesario tener un control y registro de la temperatura del ambiente circundante al sistema. Para esto se utilizó un sensor de temperatura análogo LM35, el cual entrega 10mV/°C, es un sensor lineal de fácil uso, certero y de bajo coste.

Debido a que el sensor LM35 es de un material plástico, su transferencia de calor es lenta, por lo tanto no es la mejor opción para controlar la temperatura superficial del sistema. Puesto que los cambios de temperatura ambiente no son muy bruscos, y están siempre en los mismos rangos, se recurrió a la propiedad de los metales de cambiar su resistencia eléctrica con la temperatura, para construir sensores de temperatura que pueden ser adaptados fácilmente a la superficie del banco de pruebas.

La calibración de estos sensores de temperatura, se realizó a partir de la lectura entregada en distintas temperaturas por el sensor LM35, el cual no necesita de calibración.

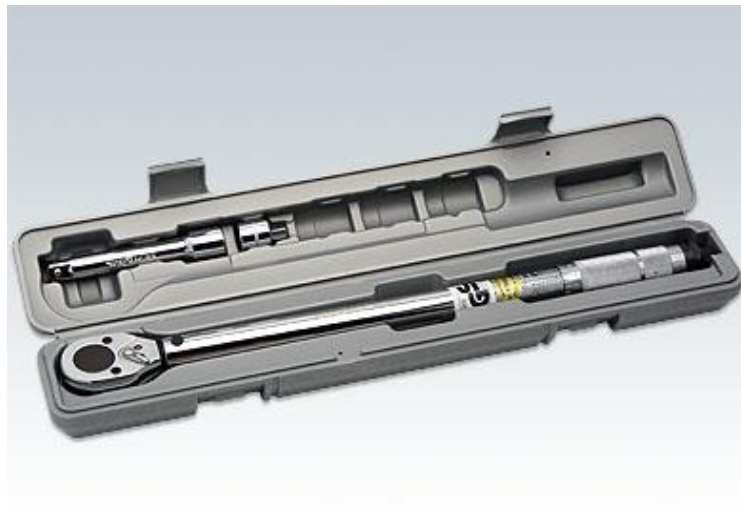
Figura 30. Sensor de Temperatura



➤ **Torquímetro**

Este elemento permite medir y calcular el torque de ajuste a las tuercas que tensionan los pernos de las bridas a usar. Es totalmente necesario contar con este medidor, puesto que un factor determinante en el buen desempeño de un sello hidráulico es la correcta aplicación de las etapas de apriete, y la magnitud del torque aplicado.

Figura 31. Torquímetro



Fuente: Waft

## ➤ Elementos para el montaje

### Cinta Teflón (PTFE)

Figura 32. Cinta teflón

Fuente: Ardiles Import



Se utiliza para crear y garantizar un sello entre dos elementos roscados. Cada vez que una unión en la cual se utilizó esta cinta, lo recomendado es retirarla totalmente y ubicar un trozo nuevo.

### Llaves mixtas

Figura 33. Llaves mixtas

Fuente: Herramientas y equipo Hem



Son utilizadas para sostener y apretar las tuercas que tensionan los pernos de las bridas. También son usadas para ajustar accesorios y elementos de unión en el sistema. Es necesario tener dos juegos, uno en medidas milimétricas y otro en pulgadas.

## ➤ Computador

Se dispuso de un computador, para registrar y administrar todos los datos obtenidos durante la aplicación de una prueba. Adicionalmente, este equipo es una terminal con una interfaz amigable que permite la interacción entre el usuario y el sistema de pruebas.

### Características:

- ✓ Sistema Operativo: Windows XP o superior con Net.Framework 4 o superior
- ✓ CPU: 2 GHz – 1 Gb RAM o superior
- ✓ Conexión USB

**5.2.4 Oportunidades de complementos** El diseño del banco de pruebas hidrostáticas, se concibió con el ideal de poder adicionar en el futuro nuevos módulos y aditamentos según las necesidades que se presenten.

➤ **Facilidades adicionales**

Como proyección futura y flexibilidad adicional del sistema, este se diseñó con la posibilidad de disponer en próximas actualizaciones de facilidad y/o módulos que permitan evaluar o adicionar una nueva variable a la prueba en desarrollo. Ninguno de estos módulos se desarrolló en esta fase, pero dejan abierta la posibilidad de ser incluidos, así como la capacidad del sistema de servir a distintos propósitos. Logrando así la flexibilidad de trabajo esperada.

Estas facilidades se pospusieron para una próxima fase, con el fin de adaptar y ajustar totalmente las características principales del sistema (presión, temperatura, torque), adicionalmente del costo que implican estas adiciones. Entre estas posibles adiciones se dejaron planteadas las siguientes:

**Módulo con sistema retriever de entrenamiento para cambio de cupones de corrosión**

Como una herramienta de ayuda en entrenamiento para la industria petroquímica se propone un módulo que permita realizar capacitaciones en la utilización de sistemas retriever para el cambio de cupones de prueba de corrosión en una línea con las condiciones de presión de un sistema usual operando en campo.

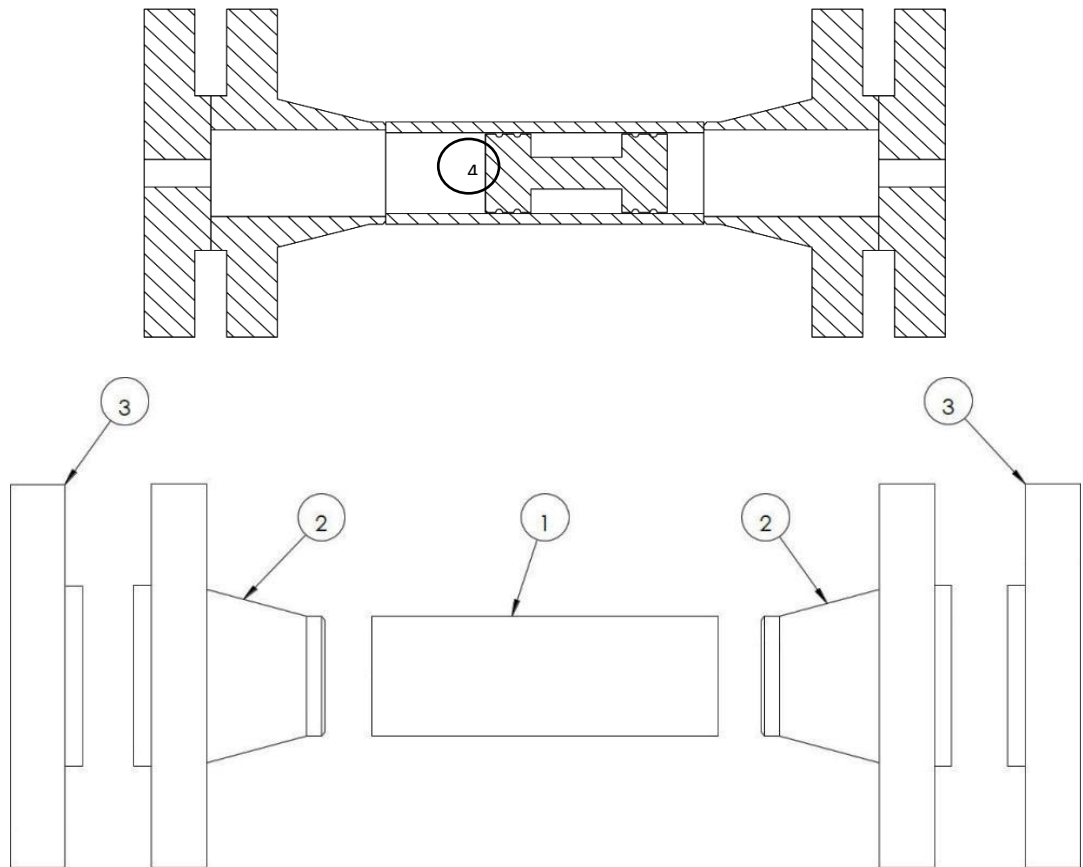
**Facilidad para elevar la temperatura de trabajo del sistema**

En aras de emular de la mejor manera posible todas las condiciones reales de trabajo de un sistema real, esta facilidad permitirá modificar la temperatura del fluido de trabajo para evaluar su influencia en el desempeño de determinado sello hidráulico.

### Acople Sistema de potencia – Sistema de pruebas

De manera consecuente con el ideal de flexibilidad, se propone que en una próxima fase el sistema pueda manejar distintos tipos de fluidos de prueba, desde agua hasta soluciones salinas o aceites, por esta razón, al utilizar la bomba manual elegida (Enerpac P39), la cual es del tipo oleo hidráulica, el tipo de fluido de trabajo está limitado, adicionalmente si se decide cambiar el fluido recomendado de trabajo para este tipo de bombas esta podría funcionar incorrectamente e incluso fallar. Teniendo en cuenta lo anterior se propone construir un cilindro que permita separar los fluidos de potencia y de prueba, dotando al sistema de versatilidad. Este acople está basado en el mismo concepto usado en las bombas de concreto, las cuales poseen dos cámaras para separar el aceite hidráulico usado por la bomba, la cual desplaza los cilindros, que en otra cámara empujan el concreto hasta su destino.

Figura 34. Cilindro de acople y separador de fluidos



- 1 - Cilindro – Pistón – Tubo 1” SCH 80
- 2 - Brida para soldar 1” C2500 (RTJ)
- 3 - Brida Ciega 1” C2500 (RTJ)
- 4 – Embolo interno – Acero Inoxidable SAE 316

El sistema de acople y divisor de fluidos se propone con un cilindro (1) el cual cuenta con un pistón, que permite separar la línea en tres cámaras diferentes, tal cual se puede apreciar en el corte presentado en la figura anterior. Estas cámaras permiten un mayor aislamiento entre el fluido de potencia y el fluido de trabajo. Por facilidad de montaje y economía se sugieren bridas soldadas en los extremos del cilindro (2) las cuales se ensamblan a bridas ciegas sobre las cuales se roscarán adaptadores para la unión vía mangueras entre el sistema de potencia y el acople.

Se prescindió de la implementación de este módulo en esta fase, por el alto costo que implica y no se imprescindible para el funcionamiento del banco de pruebas hidrostáticas. Adicionalmente, las necesidades de la empresa solicitante implican pruebas hidrostáticas a sellos sometidos a un ambiente de aceite hidráulico como fluido de prueba.

### **5.3 RESUMEN DEL DISEÑO FINAL**

A continuación se presenta un resumen general del diseño final, y su configuración final con la ubicación de los sensores y demás aditamentos. El primer ensamble presentado es la configuración Brida RF C150, su configuración, uso y montaje es extensible a las otras configuraciones definidas anteriormente configuraciones.

Diámetro Nominal NPS: 1”

Acoples y válvulas: >10.000 Psi

Adquisición de datos: Plataforma Arduino con conexión USB a computador

Sensores: Presión – Wika A10    Temperatura - LM35

Figura 35. Esquema final del banco de pruebas

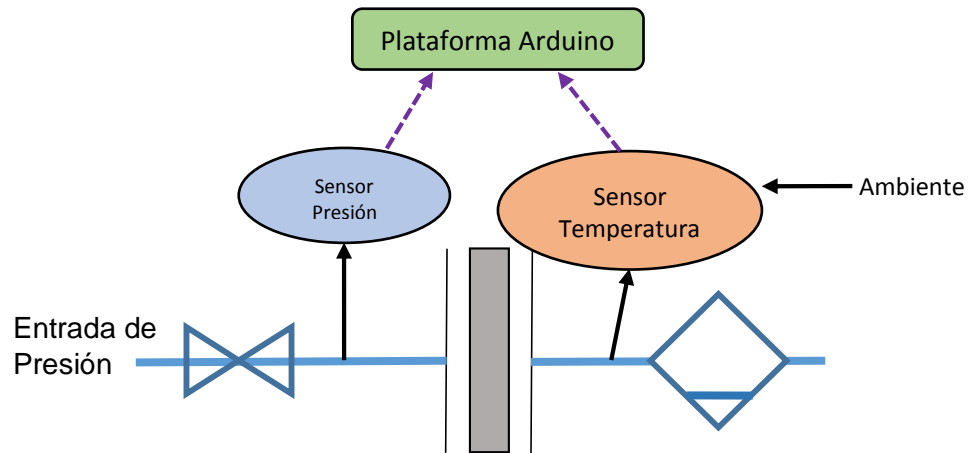


Figura 36. Montaje brida RF 1" C150



Figura 37. Bridas adicionales disponibles



Figura 38. Sellos prioritarios a evaluar



#### 5.4 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

Con el fin de tener un sistema confiable que pueda cumplir su objetivo principal, se realizó un montaje sin incluir bridas o sellos. Este montaje incluyó la bomba hidráulica, los accesorios de unión a la entrada de presión al sistema, manómetro análogo, sensor de presión y sensor de temperatura. En el anexo D, se presentan las gráficas obtenidas durante el proceso de calibración.

A través de esto, se buscaba ver el comportamiento de los elementos, determinar si en los elementos y accesorios del montaje se presentaban fugas u otros inconvenientes, el ensamble realizado fue el siguiente:

Figura 39. Montaje de calibración



A partir de estas pruebas preliminares logró determinar ciertos aspectos importantes a tener en cuenta al momento de presurizar el sistema.

Se pudo establecer que la bomba no es una opción para mantener la presión en el sistema, tal como lo hace notar el manual de la misma, la bomba solo debe ser utilizada para suministrar un flujo de aceite a un sistema y elevar la presión del mismo, pero nunca para sostener una carga de presión, ya que esta comienza a disminuir gradualmente. Es necesario disponer de otro elemento para tal fin. Esta es la razón principal por la cual se dispuso de una válvula a la entrada de presión del sistema, así una vez la bomba alcance el nivel de presión deseado, esta válvula se cierra, evitando que la bomba deba sostener los niveles de presión.

Los ensayos realizados, también definieron que una vez el sistema es presurizado y se cierra la válvula de entrada de presión, es necesario mantener la bomba presurizada por al menos 30 minutos. De no hacerse esto, la diferencia de presión en la entrada y salida de la válvula cambia abruptamente, impidiendo que la válvula asiente perfectamente y mantenga confinada la presión en el sistema.

Pruebas de este montaje durante 24 horas, hicieron notar que el cambio de temperatura en el ambiente representa grandes cambios de presión, los cuales pueden inducir a emitir juicios incorrectos sobre el desempeño de un sello si no se monitorea la temperatura y se tiene en cuenta su efecto.

El transductor de presión utilizado, envía una señal de 4-20 mA proporcionalmente lineal a la presión leída. En vista de que la interfaz Arduino contiene lectores análogos de tensión (0 – max 5V), es necesario tratar esta señal para convertirla en una señal de tensión y no de corriente. Ver anexo F. Se pudo notar, que diversos factores afectaban la lectura de la señal de tensión del sensor (ruido eléctrico, ambiente, etc.). Por lo tanto, para una misma presión, la señal de tensión era variante, pero no su delta de cambio. Debido a esto, se instaló un botón pulsador que permite fijar un punto de referencia de presión 0, a la presión atmosférica antes de comenzar las lecturas.

El sensor de temperatura LM35, no necesita ser calibrado. En cambio, este sensor se usó como referencia para la calibración de las termocuplas fabricadas.

**5.4.1 Resultados del proceso de calibración** El proceso realizado para calibrar el sistema, y conocer el funcionamiento específico de los elementos, finalizó con un aprendizaje inicial de factores y procedimientos a considerar. Estos resultados, son resumidos así:

- La bomba no debe ser utilizada para sostener la carga de presión del sistema.
- La válvula de entrada de presión, debe ser cerrada una vez se alcance el nivel de presión deseado, y se debe mantener la bomba presurizada durante al menos 30 minutos
- Se debe monitorear la temperatura en todo momento de funcionamiento del sistema. La presión interna cambia considerablemente con el cambio de temperatura
- Es necesario configurar el nivel de referencia de presión 0 a presión atmosférica antes de comenzar las lecturas de presión

## **6. DISEÑO DE LA PRUEBA HIDROSTÁTICA**

El estándar de prueba hidrostática diseñado, se basa en las recomendaciones de las norma ASME Boiler&Pressure Vessel Code 2010 Section VIII Rules for Construction of Pressure Vessels Division I y experiencias registradas por fabricantes y usuarios de la industria.

Estos procedimientos, pueden ser aplicados a sellos hidráulicos comunes comercialmente, los cuales poseen en su ficha técnica sus características de funcionamiento, las cuales se tratarán de verificar a partir de la prueba. También, se pueden implementar los procedimientos diseñados para caracterizar un nuevo modelo de sello hidráulico, ya sea con un nuevo material o una nueva configuración. Ver anexo G.

### **6.1 TORQUE A APLICAR**

El torque aplicado durante el montaje de un sello hidráulico en una brida, es uno de los aspectos más importantes para garantizar el buen desempeño de una junta. Un torque por debajo del valor correcto, no asentará bien el sello a las caras de las bridas y por tanto dará lugar a fugas, por otro lado, un torque por encima del valor correcto, puede hacer que el material del sello falle por compresión, o perjudicar la integridad de las bridas o los pernos.

No basta solo con aplicar el valor correcto de torque, es importante hacerlo siguiendo la indicaciones estándar, es decir el orden de apriete de los pernos y las etapas de aplicación del torque hasta llegar al valor correcto.

Se ha tomado como referencia la obra Juntas Industriales del señor José Carlos Veiga, la cual explica y compila información concreta sobre el uso de uniones industriales resumiendo gran parte de la norma ASME BPVC S VIII. Adicionalmente, esta obra aprovecha la vasta experiencia acumulada por la empresa Teadit®, la

cual ha desarrollado correlaciones y procedimientos de cálculo experimentales con software y experimentación propia.

**6.1.1 Mínima fuerza de compresión en la junta** Se debe determinar la mínima fuerza que se debe hacer para “aplastar” la unión hecha. Existe un mínimo valor que se debe aplicar a la unión (sin presión de operación) para asegurar que el sello haga su función y llene todas la imperfecciones de las caras de las bridas, garantizando así un buen sello. Al aplicar presión al sistema, esta presión tratará de empujar el sello radialmente, y de separar las bridas de unión, por lo cual la fuerza ejercida por el apriete de los pernos, ya no es la misa, puesto que se resta la fuerza ejercida por la presión del fluido interno; esto genera otro valor mínimo que asegure que con la presión de operación, el sello siga comprimido por las bridas de unión. Adicionalmente, es necesario comprobar el valor mínimo de apriete supere el esfuerzo permisible del sello. Por lo tanto, deben comparar:

- Fuerza mínima de la unión sin presión interna
- Fuerza mínima de la unión con presión interna
- Fuerza máxima por la resistencia del material del sello

$$N = \frac{de - di}{2} \quad N \rightarrow \text{Ancho radial del área de contacto [in]}$$

$de \rightarrow$  Diámetro exterior de contacto del sello [in]

$di \rightarrow$  Diámetro interior de contacto del sello [in]

$$b_0 = \frac{N}{2} \quad b_0 \rightarrow \text{Ancho básico de aplastamiento [in]}$$

$$b = b_0 \quad \text{sí } b_0 \leq 0.25 \quad b \rightarrow \text{ancho efectivo del sello [in]}$$

$$b = 0.5 * \sqrt{b_0} \quad \text{sí } b_0 > 0.25$$

$$G = de - 2 * b$$

$G \rightarrow$  Diámetro de los puntos de aplicación de las fuerzas de reacción [in]

$$W_{\min \text{ sin presión}} = \pi * b * G * y \quad W_{\min \text{ sin presión}} \rightarrow \text{Fuerza mínima sin presión [lb]}$$

$$W_{\min \text{ con presión}} = \frac{\pi * G^2 * P}{4} + 2 * b * \pi * G * m * P$$

$$W_{\min \text{ con presión}} \rightarrow \text{Fuerza mínima con presión [lb]}$$

$y \rightarrow$  Presión mínima de aplastamiento [Psi]      Ver anexo H

$m \rightarrow$  Factor de junta      Ver anexo H

$P \rightarrow$  Presión de trabajo [Psi]

La fuerza necesaria para mantener el sello, por tanto, será la mayor entre la Fuerza mínima con presión y la Fuerza mínima sin presión.

Posteriormente, es necesario confirmar que esta fuerza pueda ser soportada por el material del sello a utilizar. Con ayuda de la siguiente formula:

$$W_{\max \text{ material}} = S_y * \frac{\pi * (d_e^2 - d_i^2)}{4}$$

$W_{\max \text{ material}} \rightarrow$  Fuerza máxima por la resistencia del material del sello [Lb]

$S_y \rightarrow$  Esfuerzo o presión máxima del material del sello [Psi]

Si el valor de la fuerza máxima admitida por la resistencia del material del sello, es menor que la fuerza necesaria para mantener el sello, el sello no es útil bajo las condiciones planteadas. Por tanto, se debe plantear una presión de trabajo menor o aumentar el área efectiva del sello.

**6.1.2 Torque de apriete en los pernos** Los pernos y tuercas recomendados para el tipo de bridas trabajados son los que obedecen a las norma ASME A193 y A194 respectivamente. Utilizando en este caso y por recomendación de fabricantes de bridas y sellos en general pernos grado B7 y tuercas grado 2H. Ver anexo B

Al igual que en la sección 6.1.1, debe comprobarse que los pernos tienen la resistencia suficiente para soportar la fuerza de compresión en las bridas y de

tensión en los pernos. Teniendo en cuenta la recomendación de la norma ASME PCC-1 capítulo 12, se debe considerar un esfuerzo mínimo (Prestress) en los pernos grado B7, que puede ser de 50.000 Psi.

$$W_{\text{max perno}} = A_{\text{perno}} * S_{y \text{ perno}} * \# \text{ pernos}$$

$$W_{\text{max perno}} \rightarrow \text{Tensión máxima del perno [Lb]}$$

$$A_{\text{perno}} \rightarrow \text{Área del perno hasta la raíz de la rosca [in}^2\text{]} \quad \text{Ver anexo C}$$

$$S_{y \text{ perno}} \rightarrow \text{Esfuerzo máximo del perno [Psi]}$$

$$\# \text{ pernos} \rightarrow \text{Numero de pernos en la brida calculada} \quad \text{Ver anexo I}$$

Si fue posible determinar una fuerza mínima necesaria para comprimir el sello hidráulico en la sección 6.1.1, esta debe compararse con la fuerza máxima permisible por los pernos. Si esta primera, excede el valor permisible por los pernos, se debe considerar la posibilidad de cambiar los pernos por un grado con mayor resistencia a la tensión, o un área más grande, si es posible.

Como siguiente análisis, se comprueba si la fuerza mínima necesaria en el sello es suficiente para lograr la condición de precarga de los pernos.

$$W_{\text{prestress pernos}} = A_{\text{perno}} * 50.000 \text{ [Psi]} * \# \text{ pernos}$$

$$W_{\text{prestress pernos}} \rightarrow \text{Fuerza para precargar los pernos [Lb]}$$

Posteriormente, se compara la fuerza necesaria para precargar los pernos con la fuerza mínima para comprimir el sello. Si esta última es mayor que la fuerza de precarga, esta es la fuerza que se usa para determinar el torque de apriete. En caso contrario, la fuerza utilizada para determinar el torque de apriete es la fuerza de precarga de los pernos, siempre y cuando esta no sobrepase la fuerza máxima de compresión del material del sello.

Una vez hechas las comparaciones entre los valores de fuerza obtenidos, se define el valor real de la fuerza a aplicar para comprimir el sello hidráulico. Con este valor, se procede a determinar el torque en cada perno.

$$T_{perno} = \frac{k * F_{compresión} * d_{perno}}{\# \text{ pernos} * 12} \quad T_{perno} \rightarrow \text{Torque total en cada perno [Lb - ft]}$$

$k \rightarrow$  Factor de fricción      Ver anexo J

$d_{perno} \rightarrow$  Diámetro nominal del perno [in]      Ver anexo I

## 6.2 PROCEDIMIENTOS DE CARACTERIZACIÓN

La prueba hidrostática diseñada se basó en estándares de pruebas hidrostáticas que guiaron y se complementaron entre sí para elaborar los procedimientos que se presentan. Con el acompañamiento de la empresa solicitante (Diacor SAS) se mantuvo siempre presente el concepto de implementar un conjunto sencillo y práctico, pero con resultados fiables y coherentes.

En virtud de mantener la filosofía inicial, las pruebas estándar fueron adaptadas para ser replicadas con resultados similares en un montaje Brida-Sello, sometido a presiones de trabajo real en sistemas industriales. Los resultados se basaron en cumplir y replicar condiciones de operación que validen un comportamiento y característica del sello hidráulico.

Los procedimientos descritos, hacen referencia a un montaje de una sola brida RF 1" C150, el cual se usó como referencia y elemento principal por la priorización de necesidad en la empresa. Sin embargo, estos procedimientos son extensibles y aplicables al sistema montado con la cantidad de bridas incluidas y/o el tipo y clase de brida escogida.

**6.2.1 Montaje del sello a evaluar** Antes de comenzar a realizar cualquier tipo de prueba, se debe realizar el montaje del sello sobre la brida. Para ellos es necesario tomar en cuenta las recomendaciones generales de todos los fabricantes de sellos hidráulicos y referenciar los protocolos de la norma ASME PCC1.

- Limpiar totalmente las superficies de las bridas que entraran en contacto con el sello, eliminando cualquier rastro de suciedad, partículas sólidas o líquidas.
- Igualmente realizar el paso anterior con el sello a utilizar
- Ubicar el sello en su sitio correspondiente sobre una de las bridas. Asegurarse que las dimensiones del sello sean las adecuadas para el tipo y clase de brida utilizada.
- Ubicar la otra brida sobre el sello. Procurar que el sello se encuentra concéntrico respecto a la brida.
- Limpiar los pernos, y retirar cualquier tipo de material particulado de los filetes del mismo. Un perno que presente signos de corrosión, preferiblemente deberá ser reemplazado. Los pernos pueden ser lubricados con grafito.
- Ubicar los pernos en sus posiciones e ir apretando las tuercas a mano, a ambos lados de las bridas, hasta que comiencen a ajustar levemente sobre el sello las caras de las bridas, en la medida de lo posible manteniendo una simetría en el eje vertical del perno.
- Ir realizando el ajuste siempre en el patrón de cruz registrado en la norma ASME PCC1. Si en este punto el sello no está centrado, o presenta inconvenientes a la vista, es posible desmontar y comenzar nuevamente.
- Una vez consultado y/o calculado el torque final de apriete, tener en cuenta que este se aplica por etapas y con el patrón de cruz, nunca en un solo paso.
- Ajustar todos los pernos hasta el 30% el torque final respetando el patrón en cruz.

- Procurar no ajustar más de media vuelta en un solo perno. Si este gira más de media vuelta y no ha alcanzado el valor del paso, continuar con el siguiente, y repetir el proceso si es necesario
- Repetir los pasos anteriores ajustando los pernos hasta el 60% del torque final respetando el patrón de cruz
- Ajustar los pernos hasta el 100% del torque final respetando el patrón de cruz
- Confirmar y ajustar los pernos al 100% del valor del torque final, esta vez en sentido circular
- Esperar al menos 4 horas y repetir el paso anterior ajustando los pernos en un patrón circular

Si se está realizando la comprobación de un sello hidráulico comercial, la ficha técnica de este contendrá el torque recomendado a aplicar. De lo contrario, se procede con los pasos de la sección 6.1, para calcular el torque necesario. Vale aclarar que este procedimiento arroja el mínimo torque necesario, por lo que en caso de presentarse fugas en un sello sobre el cual se calculó el torque de apriete, se debe realizar un nuevo montaje incrementando el valor del torque en pasos de 20% del rango disponible antes de llegar a la fuerza de compresión limitante para el apriete, ya sea el límite máximo de resistencia del material del sello o de los pernos.

**6.2.2 Prueba de goteo** La implementación de este procedimiento permite determinar de qué forma se comporta un determinado sello hidráulico a distintas presiones respecto a las fugas presentes. Ya sea por su poca capacidad de deformarse y ocupar y rellenar las imperfecciones sobre las caras de las bridas, o porque su permeabilidad es considerable respecto al fluido de trabajo. Es importante recordar que no existe un material totalmente impermeable ni una junta totalmente sellada, así como lo recalca el señor José Veiga: “Partiendo del principio de la inexistencia de fuga cero, si una junta está o no perdiendo, depende del método de medición o criterio usado”<sup>1</sup>

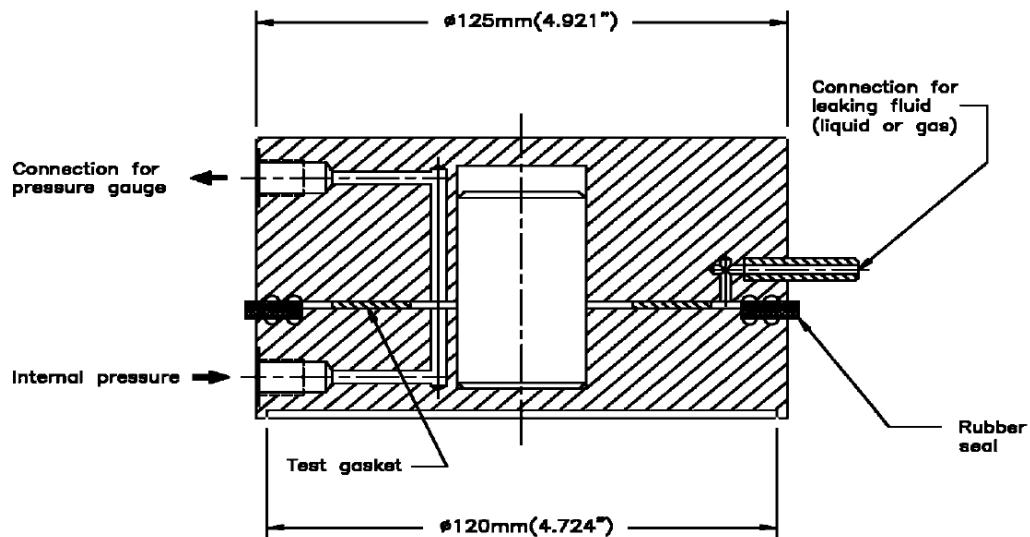
---

<sup>1</sup> CARVALHO VEIGA, José Carlos. Juntas Industriales. Rio de Janeiro: Brasil form Chesterman, 2003. 235 p.

La prueba a realizar, se basó en estándar ASTM F2378 para comprobar la capacidad de sellado de empaques. Esta prueba permite someter un sello a situaciones de presión superiores a la cuales fue diseñado el sello. Los resultados, permiten determinar qué tipo de aplicaciones pueden permitir una determinada cantidad de fuga del fluido interno.

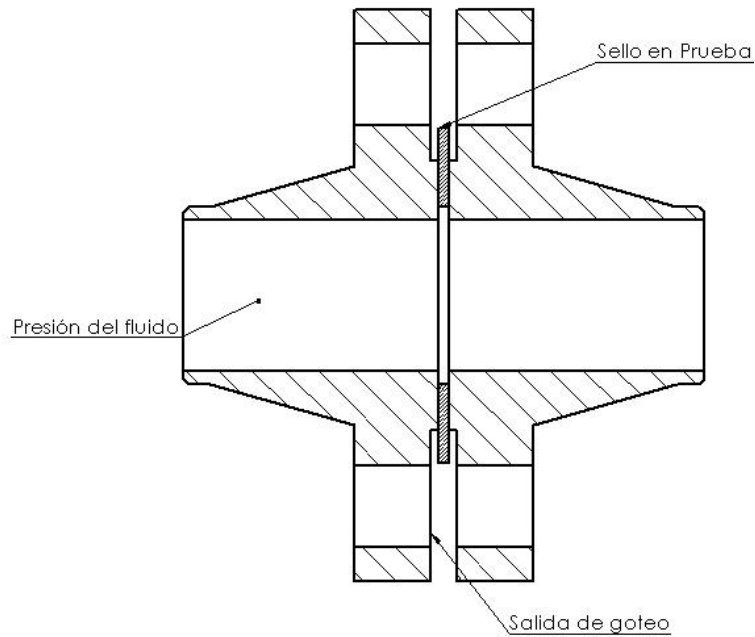
El estándar sugiere realizar el siguiente montaje para evaluar la capacidad de sellado:

Figura 40. Ensamble estándar ASTM F2378



En este procedimiento, el elemento que aprisiona el sello para aplicar una carga, es emulado por las bridas que soportan el sello, de igual manera, la carga aplicada se hace de forma gradual según las recomendaciones de instalación comunes del sello hidráulico a evaluar. Adicionalmente al procedimiento propuesto en la norma, en el diseño de sellos no caracterizados, se complementará el análisis realizado para determinar el torque de apriete y definir el valor óptimo. Durante la prueba se evaluará la cualidad del sello de mantener la presión del fluido (capacidad de sellado) y el goteo en el contacto brida-sello-brida, así como una descripción cualitativa del estado del sello después de la prueba.

Figura 41. Simulación del estándar ASTM 2378



Así el desarrollo de esta prueba se realiza de la siguiente forma:

- Realizar el procedimiento a una temperatura ambiente de entre 20°C y 30°C. Si se realiza a una temperatura diferente, se debe aclarar y registrar.
- Realizar una medición dimensional y del peso del sello a evaluar. Registrarlos en el formato correspondiente. Ver anexo K
- Registrar el tipo y clase de brida a usar.
- Realizar el montaje común del sello, teniendo en cuenta el torque recomendado a aplicar o calculándolo si es necesario. Registrar el valor de las etapas.
- Ubicar un recipiente de medición de volumen vacío y limpio, en la parte inferior de la unión brida-sello-brida.
- Aplicar la presión de trabajo del sello y cerrar la válvula de entrada de presión. Registrar la presión en el formato.
- Esperar 30 minutos y realizar una inspección visual. Si no existe goteo a la vista, despresurizar la bomba y esperar 30 minutos adicionales con el sistema presurizado. De lo contrario, despresurizar el sistema. Registrar la información.

- Si no existe goteo visual después de 30 minutos, realizar la misma inspección cada 30 minutos, hasta un máximo de 2 horas. Si al cabo de este tiempo aún no existe goteo a la vista, despresurizar el sistema. Realizar el registro cada 30 minutos.
- Una vez despresurizado el sistema, ya sea porque se alcanzaron las 2 horas, o porque se identificó un goteo, desmontar el sello. Registrar la presión antes de despresurizar.
- Limpiar y secar el sello, evitar presionarlo demasiado.
- Pesarse y medir el sello, Registrar los datos.
- Si hubo goteo, medir el volumen recogido y con el tiempo transcurrido determinar el flujo volumétrico de goteo.

Los resultados, permiten obtener registros de la cantidad de fluido contenida en los intersticios del sello, y el flujo volumétrico de pérdidas. Estas cualidades permiten definir en qué aplicaciones no son útiles un determinado tipo de sellos, ya sea porque la normatividad ambiental no permite tener ese flujo de goteo, o porque no se puede permitir esa cantidad de fluido filtrada a través del sello hidráulico.

$$L_{rate} = \frac{V_1}{t} + \frac{m_f - m_i}{\rho_{fluido} * t} \quad L_{rate} \rightarrow \text{Flujo de goteo en el sello} \left[ \frac{mL}{s} \right]$$

$V_1 \rightarrow$  Volumen recuperado de fluido en el recipiente por el goteo [mL]

$m_f, m_i \rightarrow$  Masa final y masa inicial del sello [g]

$\rho_{fluido} \rightarrow$  Densidad del fluido de prueba  $\left[ \frac{g}{mL} \right]$

$t \rightarrow$  Tiempo de desarrollo de la prueba [s]

Aunque no se evidencie goteo a los alrededores del sello, este comienza a filtrar parte del fluido de prueba hasta comenzar a llenar sus cavidades internas, lo cual, con el tiempo podría originar goteos y filtraciones al exterior del fluido de prueba. Por tanto no se debe despreciar la masa de fluido ganada por el sello de prueba.

Una limitante en este procedimiento, es la sensibilidad de la balanza con la cual se realizan las medidas de aumento de masa del sello. En las pruebas realizadas, la balanza tiene una sensibilidad de 0.01 [gr]. De esta forma, en caso de que el aumento de masa que se pueda registrar sea de 0 [gr], se puede garantizar que el sello evaluado, para el fluido utilizado no posee un flujo de goteo mayor a:

$$L_{rate} < \frac{V_1}{t} + \frac{0.009}{\rho_{fluido} * t}$$

➤ **Procedimiento en sellos no caracterizados**

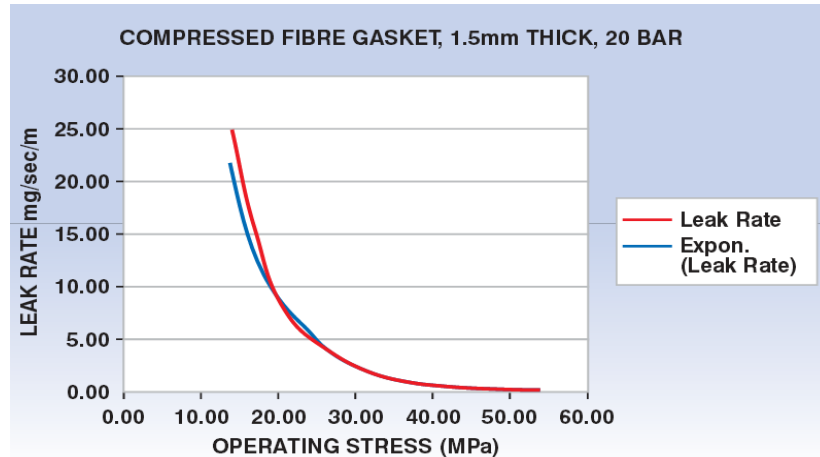
El torque aplicado a los pernos de un conjunto bridas-sello, cumple varios propósitos:

- Comprimir y deformar el sello para rellenar las imperfecciones presentes en las caras de las bridas.
- Mantener el sello en su lugar para que no sea empujado fuera debido a la fuerza radial generada por el fluido presurizado.
- Comprimir el sello para eliminar al máximo las cavidades o poros del material del sello, y evitar fugas del fluido a través de estos poros.

Esta última característica citada, puede llegar a ser crítica en algunas materiales de sellos, principalmente aquellos no metálicos. Es complicado determinar de qué forma actuaran las cavidades del material del sello, y más aún su disposición en el mismo, las cuales son aleatorias.

Sin embargo, como es de esperarse, disminuir las porosidades del material del sello se logra en gran medida aumentando de la fuerza de compresión resultante que afecta el sello. Una mayor fuerza de compresión, “aplastará” las cavidades, evitando que el fluido confinado se filtre a través de los poros del material.

Figura 42. Relación torque – flujo de goteo



Fuente: James Walker

Como es posible notar en la gráfica anterior, el aumento de la presión de apriete sobre el sello, disminuye notablemente los valores de goteo en el sello. Tomando en cuenta esto, para los nuevos diseños de sello hidráulico que no están caracterizados, y de los cuales se desconoce el comportamiento de sus porosidades respecto a un determinado fluido de trabajo, es necesario realizar el proceso siguiente:

- Realizar el montaje y procedimiento descrito en la sección 6.2.2 al mínimo valor de torque de apriete determinado bajo los cálculos de la sección 6.1
- Anotar y registrar los datos y resultados de la prueba en el formato correspondiente.
- Ejecutar nuevamente la misma prueba, pero aumentando el torque apriete en un 20% del valor del rango disponible entre la fuerza mínima y máxima de compresión, determinadas en la sección 6.1
- Realizar el procedimiento con incrementos porcentuales de 20% hasta alcanzar el 80% de la fuerza máxima de compresión. No se recomienda llegar hasta el 100% para tener un factor de seguridad respecto a la falla de algún material.
- Realizar una gráfica de los valores de torque aplicado y flujo de goteo obtenido.

A partir del procedimiento efectuado, se obtiene una caracterización y comportamiento del sello frente a un determinado fluido. Este procedimiento solo obtiene la caracterización del sello frente al fluido de prueba, otro tipo de fluido tendrá un comportamiento diferente, y deberá repetirse el proceso con el nuevo fluido.

**6.2.3 Prueba hidrostática** Con esta prueba en específico, se comprueba la principal característica del sello hidráulico: mantener confinada una presión y el fluido. Esta prueba está basada en los estándares de recipientes a presión ASME Sección VIII. También se toma como referencia la siguiente tabla de la norma ASME B16.5 para conocer los rangos de presión según la temperatura de trabajo y la clase de la brida que se trabaja. A partir de esta información se toma la referencia de los límites de presión que debe cumplir un sello para ser usado una determinada clase de brida y rango de presión.

Tabla 6. Presión de trabajo por Class

Temp °F	<i>Presión de trabajo por Class [Psi]</i>						
	Class						
	150	300	400	600	900	1500	2500
<b>-20 a 100</b>	285	740	985	1 480	2 220	3 705	6 170
<b>200</b>	260	680	905	1 360	2 035	3 395	5 655
<b>300</b>	230	655	870	1 310	1 965	3 270	5 450
<b>400</b>	200	635	845	1 265	1 900	3 170	5 280
<b>500</b>	170	605	805	1 205	1 810	3 015	5 020
<b>600</b>	140	570	755	1 135	1 705	2 840	4 730
<b>650</b>	125	550	730	1 100	1 650	2 745	4 575
<b>700</b>	110	530	710	1 060	1 590	2 655	4 425
<b>750</b>	95	505	675	1 015	1 520	2 535	4 230
<b>800</b>	80	410	550	825	1 235	2 055	3 430
<b>750</b>	65	320	425	640	955	1 595	2 655
<b>900</b>	50	230	305	460	690	1 150	1 915
<b>950</b>	35	135	185	275	410	685	1 145
<b>1000</b>	20	85	115	170	255	430	715

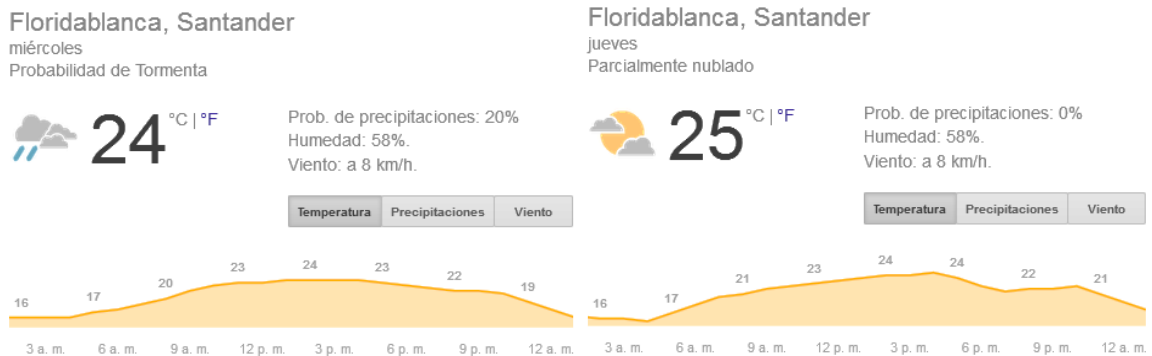
Fuente: ASME B16.5

En principio se decidió que la primera condición a controlar y manipular era la capacidad de sellado a una determinada presión. Esto por ser la más importante del sello hidráulico. Con lo cual, la experiencia que se irá adquiriendo a medida que se realicen pruebas bajo el diseño elaborado, permitirá que en una próxima fase, se implemente otra variable en el sistema, la cual no creará ruido y/o confusión respecto a los efectos generados por la presión del sistema, ya que esta última habrá sido estudiada y registrada con el fin de obtener criterios que identifiquen todas sus implicaciones.

Durante las pruebas de calibración fue posible comprobar que los cambios de la temperatura ambiente infieren cambios considerables en la presión del sistema. Debido a que durante las noches la temperatura tiende a bajar, la presión del sistema tiene tendencia a la baja, lo cual puede influir en error al momento de caracterizar el comportamiento de un sello.

Es posible realizar las pruebas en un entorno de temperatura controlada, ya sea por un sistema de refrigeración, o uno de calentamiento que mantengan la temperatura constante. Sin embargo, esto implica una inversión energética traducida en costos innecesarios. Por esto, se estableció que el mejor momento para comenzar a realizar la prueba hidrostática, es finalizada la tarde. De esta forma, el cambio de temperatura durante la noche será muy leve, y solo se registrarán las alzas de temperatura en las horas de mayor influencia del calor transferido por el sol, entre 11am y 2pm, lo cual incrementará la presión del sistema, sometiendo al sello a condiciones más críticas. Sin embargo, al final de la prueba se deben considerar los efectos de los cambios de temperatura en los cambios de presión en el sistema. Debido a que en Colombia no hay estaciones, la temperatura a lo largo del día, durante todo el año, tiene unas tendencias relativamente constantes.

Figura 43. Temperatura durante el día



Fuente: Weather.com

En términos generales, el procedimiento desarrollado para realizar la prueba hidrostática es el siguiente:

- Realizar el montaje del sello a evaluar en la brida correspondiente, teniendo en cuenta dimensiones, clase y tipo, según la sección 6.2.1
- Se recomienda comenzar la prueba entre las 4 y 6 de la tarde.
- Definir la presión de trabajo del sello a evaluar. Ver tabla 5
- Conectar el sistema de adquisición de datos e iniciarlo.
- Presurizar el sistema hasta una presión de al menos 1.3 veces la presión de trabajo. Se recomienda entre 1.4 y 1.5.
- Cerrar la válvula de entrada de presión, y las válvulas que aíslan otras bridas, si se están probando más de un sello a la vez. Es importante seguir el orden, desde la entrada de presión hacia el otro sentido.
- Después de al menos 30 minutos despresurizar la bomba.
- La duración de la prueba es de 24 horas.
- La prueba debe ser interrumpida en caso de que se detecten fugas o falla del sello.
- Si la presión del sistema desciende por debajo del 70% de la presión de prueba, se puede dar por descartada la prueba.

- Una vez cumplidas las 24 horas, despresurizar el sistema por medio de la válvula de entrada de presión.
- Realizar una inspección visual del exterior del sello y retirarlo de las bridas, preferiblemente, con las bridas en posición horizontal
- Visualmente revisar el sello en busca de fallas y/o roturas notables a la vista.
- Imprimir o conservar en digital, los datos obtenidos para analizar los resultados posteriormente.

➤ **Procedimiento para sello no caracterizado**

En caso de un nuevo sello, o nuevo material, se debe realizar este procedimiento para determinar su presión de trabajo, teniendo en cuenta la norma ASME Sección VIII para recipientes a presión.

- Establecer la presión esperada de trabajo del sello hidráulico. Esta presión puede estimarse con ayuda del cálculo del torque de apriete citado en la sección 6.1
- Realizar el montaje del sello sobre la brida correspondiente (Class, tipo y dimensión) siguiendo los procedimientos de la sección 6.2.1
- Presurizar el sistema hasta la mitad de la presión esperada.
- Esperar 30 minutos, revisar niveles de presión y realizar una inspección visual del montaje.
- Realizar incrementos en pasos de 10% cada 30 minutos, realizando las debidas inspecciones y anotaciones hasta alcanzar el 100% de la presión esperada
- Despresurizar el sistema por medio de la válvula de entrada de presión y retirar el sello.
- Si el ensayo concluye con éxito, se debe realizar una nueva prueba con el mismo tipo de sello bajo el procedimiento del numeral 6.2.3

**6.2.4 Análisis de resultados de los procedimientos** Los resultados obtenidos de los procedimientos descritos anteriormente, han de ser analizados procesados y comparados con una base de datos, con el fin de caracterizar el sello que se está evaluando.

A partir de lo establecido, es posible definir la presión de trabajo de un determinado sello, y si este por lo tanto, cumple el estándar de presión de la norma ASME B16.5 para funcionar como sello hidráulico de este tipo de bridas. La principal condición establecida, para que un sello pueda cumplir con esta norma se establece a partir de la prueba hidrostática, y esta es:

$$P_{\text{mínima de prueba}} \geq \frac{P_{\text{prueba}}}{1.3}$$

Tabla 7. Caracterización del sello hidráulico

<b>CARACTERIZACIÓN DEL SELLO HIDRÁULICO</b>			
<b>Torque máximo [Lb-ft]</b>		<b>Class</b>	
<b>Torque mínimo [Lb-ft]</b>		<b>Brida</b>	
<b>Presión de trabajo [Psi]</b>		<b>NPS</b>	
<b>Material / Referencia</b>			
<b>PRUEBA DE GOTEO</b>			
<b>Fluido de prueba</b>			
<b>Torque aplicado [Lb-ft]</b>			
<b>Duración de la prueba [min]</b>			
<b>Flujo de goteo [mL/s]</b>			
<b>PRUEBA HIDROSTÁTICA</b>			
<b>Torque aplicado [Lb-ft]</b>			
<b>Presión de prueba (<math>P_t * 1.5</math>) [Psi]</b>			
<b>Presión Máxima [Psi]</b>			
<b>Presión Mínima [Psi]</b>	>	$P_{\text{prueba}} / 1.3$ [Psi]	
<b>Temperatura máxima</b>	[°C]		[°F]
<b>Temperatura mínima</b>	[°C]		[°F]

Con ayuda de la tabla 6 se registran los resultados en la pruebas de evaluación de un determinado sello hidráulico. Conociendo si el sello hidráulico cumple con la norma ASME B16.5 éste puede ser incluido en una clase (Class) de presión (Tabla 5). La característica de flujo de goteo del sello bajo un fluido de prueba, acompaña al sello en su ficha técnica, y dependerá de la aplicación determinar si el flujo es o no aceptable.

### 6.3 EJECUCIÓN Y COMPROBACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS

Con el fin de comprobar y certificar los procedimientos realizados, se realizaron pruebas sobre un sello comercial, del cual se conocen sus características propias obtenidas a partir de su ficha técnica.

A partir de los resultados obtenidos se comprobó que los procedimientos caracterizan el sello comercial evaluado de forma similar a su ficha técnica. El sello escogido, es Garlock Blue-Gard 3000, para brida RF de 1", sus características se presentan a continuación:

Tabla 8. Garlock Blue-Gard 3000

<b>GARLOCK BLUE-GARD 3000 1" C300</b>		
<b>P<sub>MÁXIMA</sub></b>	1 000	[Psi]
<b>FACTOR M</b>	5.20	
<b>FACTOR Y</b>	4 400	[Psi]
<b>GOTEO PROMEDIO</b>	0.20	[mL/h]
<b>GOTEO MÁXIMO</b>	1.00	[mL/h]
<b>S<sub>y</sub></b>	15 000	[Psi]
<b>TORQUE MÁXIMO</b>	67	[Lb-ft]
<b>TORQUE MÍNIMO</b>	28	[Lb-ft]

Fuente: EnPro Industries

➤ **Datos de Torque calculados:** Sección 6.1

Torque máximo: 66.57 [Lb-ft]

Torque mínimo: 28.40 [Lb-ft]

➤ **Prueba Hidrostática**

La prueba hidrostática se realizó en dos ocasiones obteniendo resultados similares de caracterización del sello hidráulico.

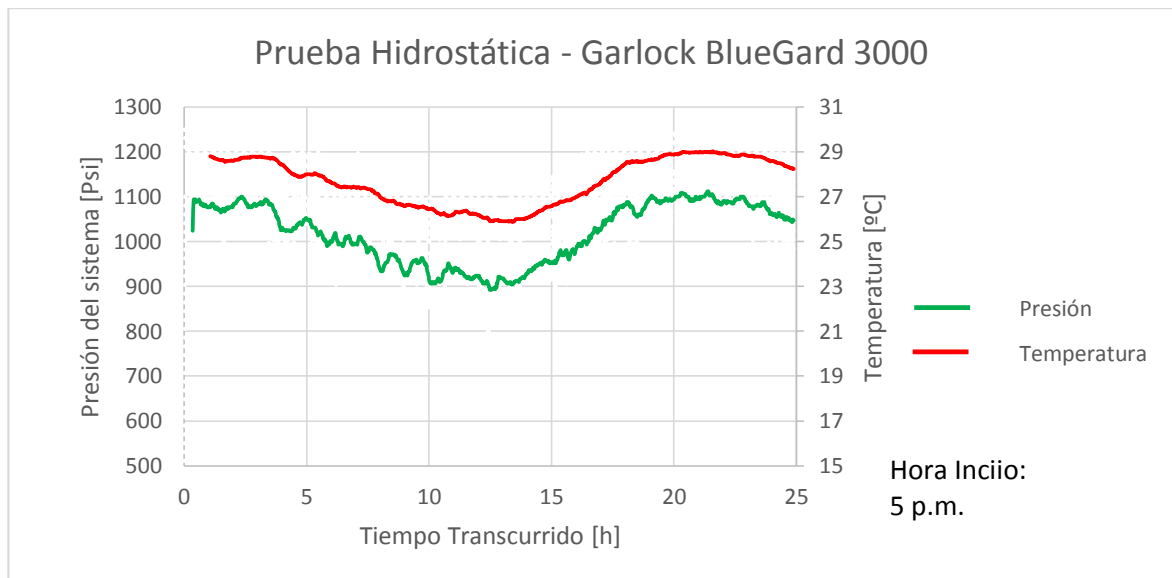
Una de las pruebas se realizó en base a la prueba hidrostática de comprobación de la presión de trabajo del sello hidráulico. La otra prueba, se realizó en base al procedimiento de prueba hidrostática para sellos no caracterizados.

**Prueba A: Comprobación de la presión de trabajo**

Presión de Trabajo: 740 [Psi]      Presión de Prueba: 1100 [Psi]

Torque aplicado: 50 [Lb-ft]

Figura 44. Prueba Hidrostática – Garlock Blue-Gard 3000



## Prueba B: Caracterización del sello Hidráulico

Presión esperada: 1100 [Psi]

Torque aplicado: 50 [Lb-ft]

Figura 45. Presión máxima del sello hidráulico

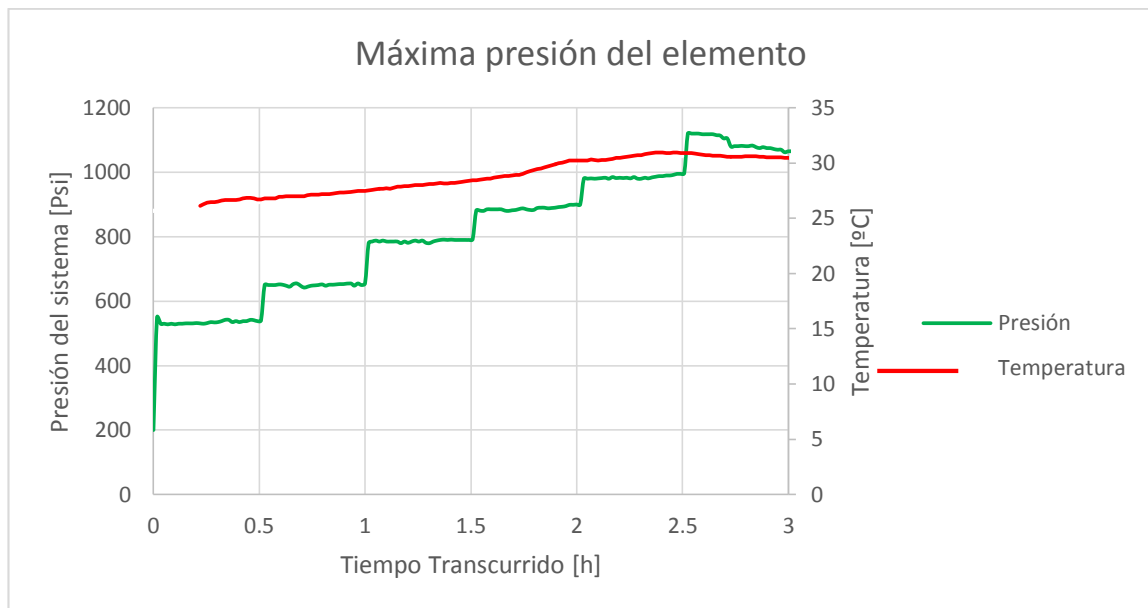


Figura 46. Montaje Garlock BlueGard 3000 – Prueba Hidrostática

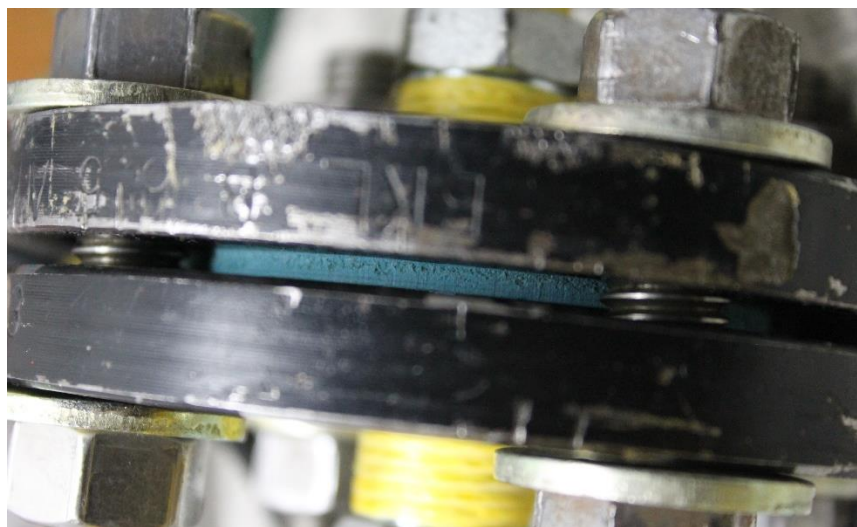


Figura 47. Garlock BlueGard 3000 – Después de la prueba hidrostática



➤ **Prueba de goteo**

Se realizaron dos pruebas con el mismo tipo de sello con el fin de determinar y caracterizar el sello según el flujo de goteo de este con el fluido utilizado.

**Prueba C1: Prueba de goteo**

diámetro<sub>exterior</sub>=2.992 [in]      diámetro<sub>interior</sub>= 1.309 [in]    espesor=0.118 [in]

Peso=5.90 [gr]      Fluido= Aceite Shell Tellus32      densidad=8.72x10<sup>-4</sup> [gr/mL]

No se presentó goteo después de las dos horas de la prueba, ni se presentaron cambios considerables en la presión del sistema.

Peso final=5.90 [gr]

Se evidenció un aumento de 0.00 [gr] en la masa del sello, teniendo en cuenta las limitaciones de sensibilidad de la balanza usada, se determina y garantiza que el sello tiene un goteo menor de 5 mL/h.

La segunda prueba realizada también arrojó un aumento de masa menor de 0.00 [gr], por lo que se determina nuevamente que el sello tiene un goteo menor de 5 mL/h para el fluido usado.

**6.3.1 Resultados obtenidos** Según los procedimientos realizados se obtuvieron resultados que lo soportan y avalan su uso para cumplir el objetivo planteado inicialmente.

Tabla 9. Resultados Garlock BlueGard 3000

<b>CARACTERIZACIÓN DEL SELLO HIDRÁULICO</b>			
<b>Torque máximo [Lb-ft]</b>	66.57	<b>Class</b>	300
<b>Torque mínimo [Lb-ft]</b>	28.4	<b>Brida</b>	RF
<b>Presión de trabajo [Psi]</b>	750	<b>NPS</b>	1"
<b>Material / Referencia</b>	Garlock		
<b>PRUEBA DE GOTEO</b>			
<b>Fluido de prueba</b>	Aceite Shell Tellus32		
<b>Torque aplicado [Lb-ft]</b>	50		
<b>Duración de la prueba [min]</b>	120		
<b>Flujo de goteo [mL/s]</b>	< 5		
<b>PRUEBA HIDROSTÁTICA</b>			
<b>Torque aplicado [Lb-ft]</b>	50		
<b>Presión de prueba (<math>P_t * 1.5</math>) [Psi]</b>	1100		
<b>Presión Máxima [Psi]</b>	1162		
<b>Presión Mínima [Psi]</b>	870	>	$P_{prueba} / 1.3$ [Psi] 846
<b>Temperatura máxima</b>	29 [°C]		84.2 [°F]
<b>Temperatura mínima</b>	25.3 [°C]		77.54 [°F]

Este sello, es efectivo para ser utilizado en bridas C300, con presiones comprobadas no mayores a 1100 Psi. Estos datos, son coherentes con las características de la ficha técnica del sello registradas en la tabla 7.

## 6.4 PRUEBAS PRELIMINARES - NUEVO DISEÑO

Después de haber realizado la calibración y comprobación del sistema y procedimientos desarrollados, se procedió con el comienzo de la caracterización de un nuevo diseño desarrollado por la empresa solicitante Diacor SAS, llamado internamente D250R. Ver anexo G.

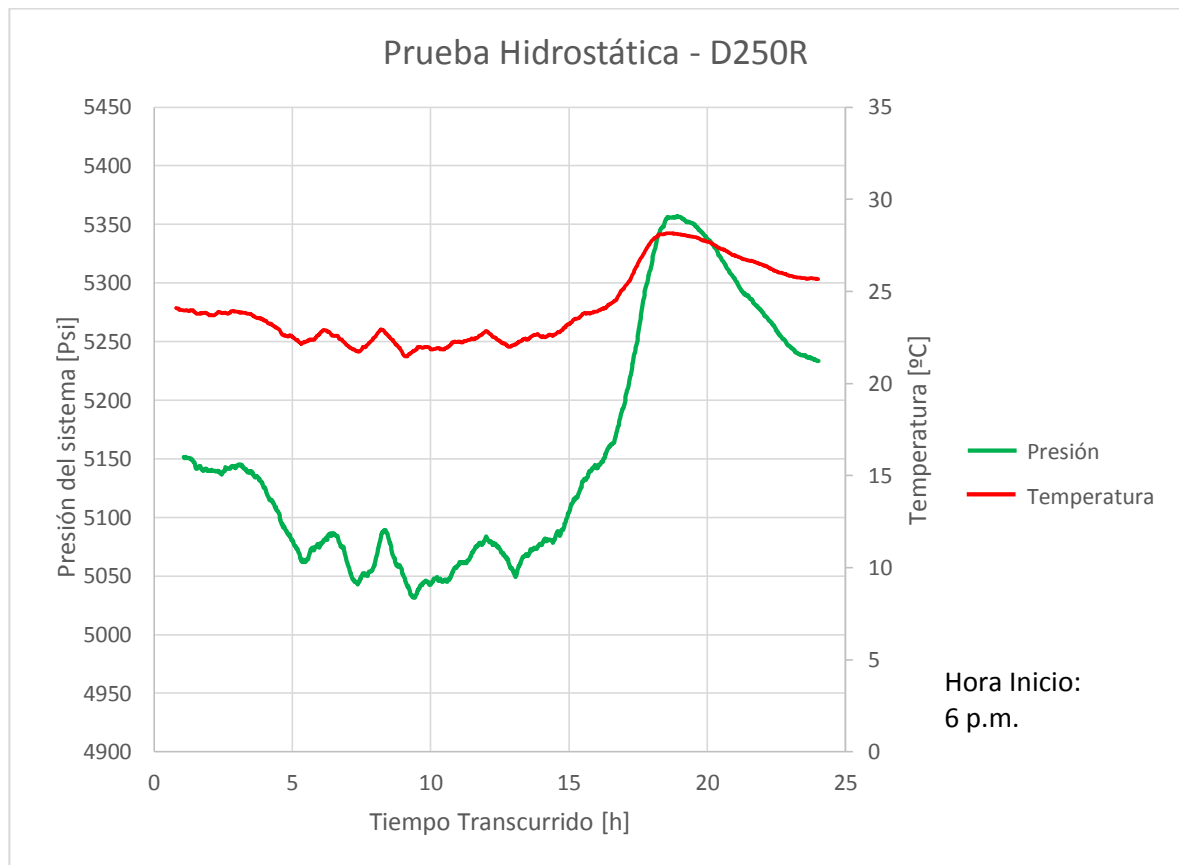
Las pruebas realizadas de caracterización, esperan situar el sello en la Class 1500 soportando presiones de más de 5.000 psi.

### ➤ Torque calculado

Torque máximo = 293 [Lb-ft]

### ➤ Prueba hidrostática

Figura 48. Prueba hidrostática D250R – Nuevo diseño



Presión de trabajo = 3705 [Psi]    Presión de Prueba = 5200 [Psi]

Torque aplicado = 220 [Lb-ft]

Brida = RF 1" C1500

Figura 49. Prueba hidrostática D250R

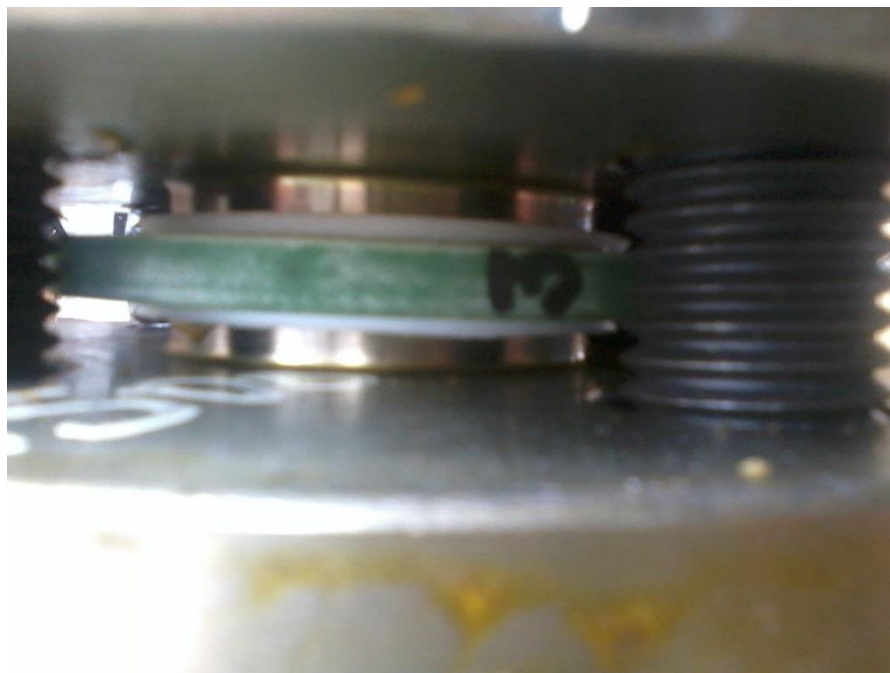


Tabla 10. Caracterización D250R

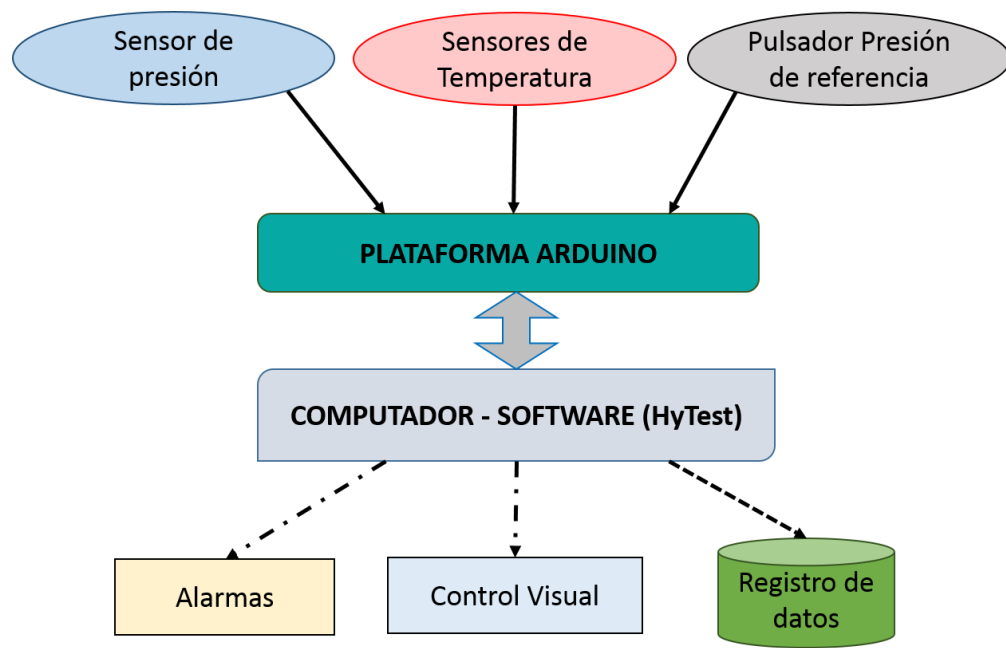
<b>CARACTERIZACIÓN DEL SELLO HIDRÁULICO</b>			
<b>Torque máximo [Lb-ft]</b>	293	<b>Class</b>	1500
<b>Torque mínimo [Lb-ft]</b>	200	<b>Brida</b>	RF
<b>Presión de trabajo [Psi]</b>	3705	<b>NPS</b>	1"
<b>Materia / Referencial</b>	D250R		
<b>PRUEBA HIDROSTÁTICA</b>			
<b>Torque aplicado [Lb-ft]</b>	220		
<b>Presión de prueba (<math>P_t * 1.5</math>) [Psi]</b>	5200		
<b>Presión Máxima [Psi]</b>	5400		
<b>Presión Mínima [Psi]</b>	4947	>	$P_{prueba} / 1.3$ [Psi] 4000
<b>Temperatura máxima</b>	29.3 [°C]		84.74 [°F]
<b>Temperatura mínima</b>	20.6 [°C]		69.08 [°F]

Posteriormente se registró una prueba adicional al mismo tipo de sello, obteniendo que la comprobación de la  $Presión_{mínima} > P_{prueba}/1.3$  se cumple. Teniendo en cuenta los resultados, el sello Hidráulico D250R es apto para ser usado en sistemas Class 1500 que trabajen a temperatura ambiente.

## 7. CONTROL Y REGISTRO DE LAS PRUEBAS

El control y registro de datos de las pruebas realizadas se realiza a partir de la plataforma Arduino y un computador con software diseñado específicamente para las necesidades del proyecto (HyTest). Las dos plataformas trabajan en conjunto, comunicándose entre sí y repartiéndose tareas de procesamiento y control.

Figura 50. Esquema de control y registro de datos



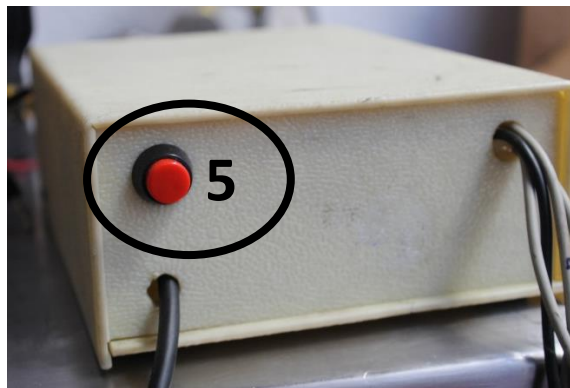
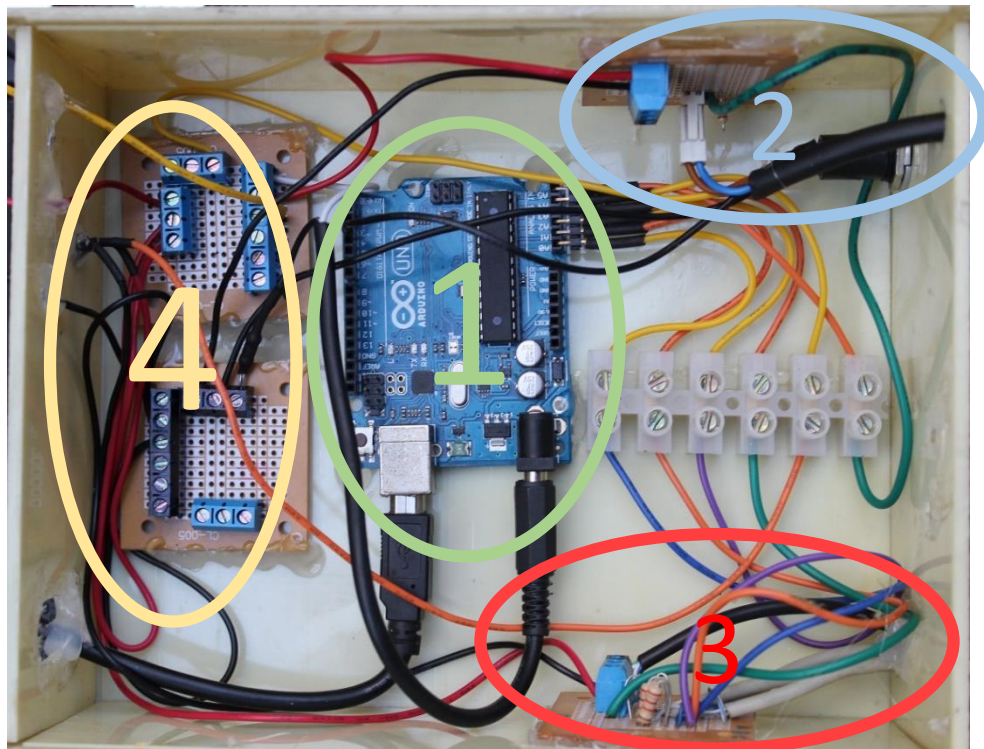
En principio se contempló el uso de la interfaz LabView - Arduino, la cual a pesar de ser robusta y sencilla, implica tener licencia del programa LabView. Además de esto, la implementación de Labview-Arduino, limita la utilización de la tarjeta Arduino a los protocolos y procedimientos desarrollados por LabView. Para configurar esta interfaz, la tarjeta Arduino debe ser cargada con un programa específico que solo es compatible para comunicar la tarjeta Arduino y LabView. Por lo tanto se optó por otra alternativa que fuese más versátil y se adaptase mejor a la necesidad presente.

La alternativa usada fue la programación de un software desarrollado en la suite de Microsoft VisualStudio.net. Un software bajo la suite de VisualStudio.net es

compatible con las versiones comerciales de pc de Windows y la licencia de uso de la solución creada está sujeta a la decisión del programador de la misma. Sumado a esto, la programación de un software en VisualStudio.net permite aprovechar los protocolos de comunicación de Windows y acceder a otros programas y formatos, es decir comunicarse vía USB, conectarse e a una impresora, crear archivos pdf, xls, etc.

### 7.1 Configuración y conexiones de hardware

Figura 51. Hardware y Conexiones



- 1 – Plataforma Arduino
- 2 – Conexión Sensor de presión
- 3 – Conexión Sensores de temperatura
- 4 – Fuente de voltaje y referencia (tierra)
- 5 – Pulsador de presión de referencia

Las conexiones y planes de circuitos se encuentran especificados en el anexo F.

**7.1.1 Conexiones interfaz Arduino** Por la configuración y tipo de sensores utilizados, fue necesario el uso de entradas de lectura análogas para interpretar la naturaleza continua de la magnitud medida. Los puertos disponibles en la tarjeta utilizada se distribuyeron de la siguiente forma:

Tabla 11. Conexiones Arduino

<b>ENTRADAS ANÁLOGAS</b>	
A0	Sensor de temperatura A
A1	Sensor de temperatura B
A2	Sensor de Temperatura C
A3	Sensor de Temperatura D
A4	Sensor de temperatura LM35
A5	Sensor de presión Wika A10
<b>ENTRADAS DIGITALES</b>	
D3	Pulsador - Presión de referencia

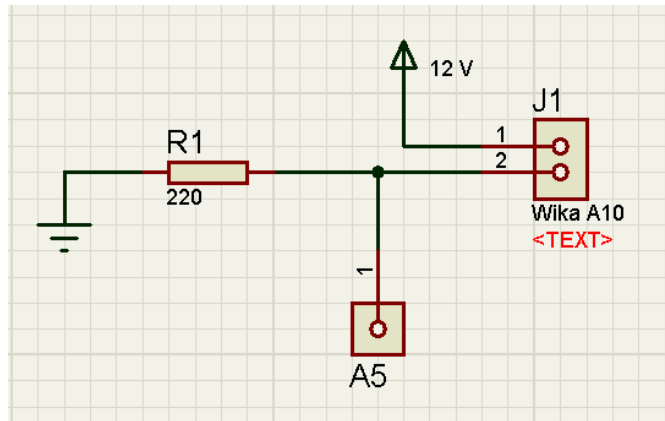
La tarjeta Arduino en su programación, monitorea y realiza el cálculo de las variables físicas de presión y temperatura de cada sensor cada vez que esta lectura es solicitada por el software de control HyTest.

El convertidor Análogo – Digital de la tarjeta Arduino, tiene una resolución de 10 bits, y está usándose a una referencia de 5 V. Esto quiere decir:

$$Sensibilidad\ de\ lectura = R_{A/D} = \frac{V_{referencia}}{Resolución} = \frac{5000\ mV}{2^{10} - 1\ bit} \cong 4.88 \left[ \frac{mV}{bit} \right]$$

**7.1.2 Configuración del sensor de presión** El sensor de presión utilizado envía una señal proporcionalmente lineal entre 4mA y 20mA. Debido a que las entradas analógicas de Arduino toman lecturas de tensión, se recurrió a la ley de ohm para convertir la señal de corriente en señal de tensión.

Figura 52. Configuración sensor de presión



$$I_{sensor} = I_{resistencia} \quad V_{lectura} = I_{sensor} * R$$

Al realizar este tipo de conexión para el sensor, la señal se ve afectada más fácilmente, debido a que cambios en la integridad de los cables usados (corrosión), longitud de los mismos, ruido de señales externas, humedad, etc., afectan la caída de tensión y por ende la lectura del sensor, debido a esto se implementó la configuración de referencia de presión.

Tras la calibración del sensor (Ver anexo D), se pudo establecer que su comportamiento se modela muy acertadamente por la siguiente ecuación:

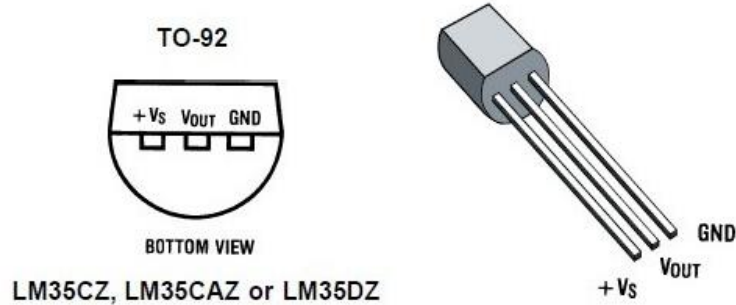
$$P_{sistema} = V_{lectura} * 10 - V_{referencia P=0} * 10 \quad [Psi]$$

$$\Delta P_{mínimo} = R_{A/D} * 10 \cong 48 [Psi]$$

$$P_{max} = 1023 * 10 = 10\ 230 [Psi]$$

**7.1.3 Configuración del sensor de temperatura** Como sensor principal de temperatura se dispuso del LM35, práctico de usar y económico.

Figura 53. LM35



Fuente: Electrónicos Caldas

Este sensor envía una señal lineal de 10mV/°C hasta una temperatura máxima de 150°C. Su desventaja es que al ser fabricado en plástico su transferencia de calor es más lenta que una configuración hecha en metal. En vista de esto, se encontró un pequeño proyecto que propone realizar medidores de temperatura que aprovechan la característica de los materiales de cambiar su resistencia eléctrica con el cambio de temperatura. Al ser unos sensores prácticos y ajustables a la necesidad, se prefirieron sobre la utilización de termocuplas comunes, las cuales requieren un circuito adicional debido a la pequeña magnitud de su señal (1.5mV @ 30°C). Estos sensores fueron calibrados a partir de las lecturas del sensor LM35 y se obtuvieron las siguientes relaciones:

$$S_A = -0.0041 * V_{lectura}^2 - 1.7581 * V_{lectura} + 311.23 \quad [^{\circ}C]$$

$$S_B = -0.001 * V_{lectura}^2 - 2.5517 * V_{lectura} + 368.09 \quad [^{\circ}C]$$

$$S_C = -0.0041 * V_{lectura}^2 - 1.7581 * V_{lectura} + 311.23 \quad [^{\circ}C]$$

$$S_D = -0.0132 * V_{lectura}^2 + 0.4846 * V_{lectura} + 188.17 \quad [^{\circ}C]$$

Se construyeron 4 de estos sensores, para ser dispuestos en la superficie del sistema de pruebas, la temperatura final obtenida es el promedio generado por los 5 sensores de temperatura funcionando al tiempo.

**7.1.4 Fuente de voltaje y referencia** Dentro del contenedor de los circuitos implementados, se dispusieron 4 sectores de alimentación con el fin de obtener la fuente eléctrica de los elementos que lo necesiten. El voltaje y corriente son suministrados por una fuente de poder de computador de 700W modificada para ser usada en el proyecto. En la configuración actual se encuentran en uso 3 de los 4 sectores con los siguientes valores de tensión disponibles:

- 5 V – Rojo – Máximo 30 A
- 12 V – Amarillo – Máximo 29 A
- Referencia o Tierra – Negro

El sector número 4 se dispuso como provisión para futuras modificaciones en las que sea necesario un nivel de tensión diferente.

**7.1.5 Pulsador de presión de referencia** Este pulsador envía una señal al sistema de control para indicar que la presión actual es la presión de referencia 0 Psi a la presión atmosférica. Se implementó para ser utilizado antes de comenzar una prueba y garantizar siempre una presión de referencia.

Esta señal hace uso de una entrada especial de la tarjeta Arduino, la cual es una entrada de interrupción. Esta entrada particular garantiza que se ejecute una acción en el programa del micro controlador sin importar que se esté ejecutando en ese instante. De esta forma se garantiza que al presionar el pulsador siempre se va a generar la configuración del nivel de referencia.

Ver Anexo F: Circuitos y conexiones electrónicas

## 7.2 SOFTWARE DE CONTROL Y REGISTRO: HYTEST

HyTest es un software desarrollado exclusivamente para el control y registro de datos del banco de pruebas hidrostáticas desarrollados en este proyecto. El software está diseñado bajo el entorno de desarrollo integrado (IDE) VisualStudio.net de Microsoft para sistemas operativos Windows, por lo cual es compatible con la gran mayoría de computadores disponibles.

Figura 54. HyTest

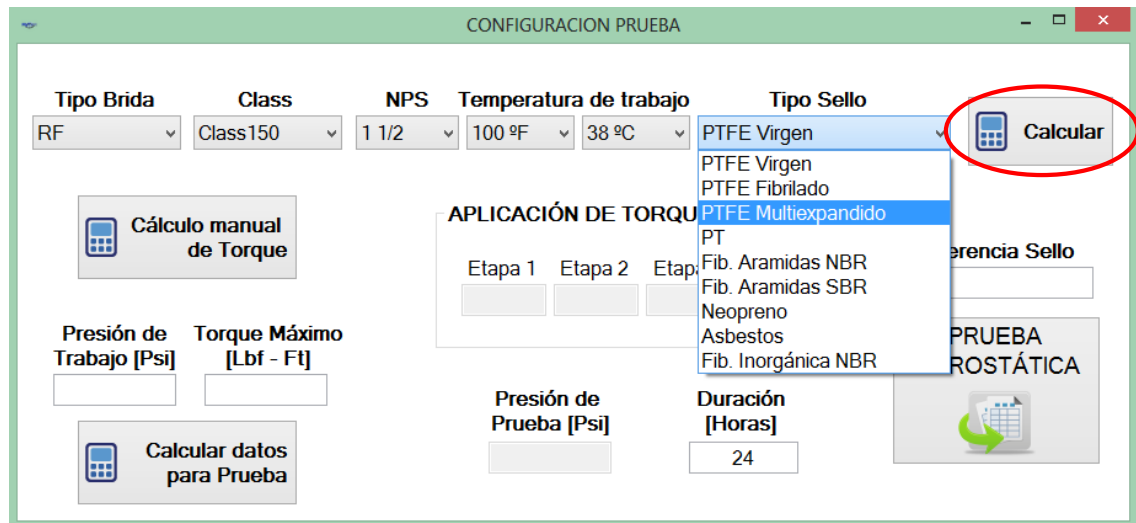


HyTest funciona en conjunto con la plataforma Arduino con un sistema de comunicación USB, a través del cual circulan datos en forma bidireccional, dependiendo así cada sistema del otro. La interfaz del software permite configurar los parámetros de la prueba, monitorearla en tiempo real, además de registrar los datos de presión y temperatura leídos, procesados y posteriormente enviados por la tarjeta Arduino.

La herramienta posee una base de datos con distintos tipos de sellos y algunas de sus características. De esta forma se comienza eligiendo un tipo de brida, la clase (Class), el diámetro nominal, la temperatura de trabajo y el material del sello a utilizar. De esta forma en la base de datos interna, se presentan los sellos disponibles a los que se puede acceder según las especificaciones dadas. Si un sello en particular no se encuentra disponible para la Class 2500, este no será

presentado como opción en el menú desplegable. Se resalta que la base de datos fue alimentada con opciones disponibles en Diacor SAS y socios distribuidores, por lo tanto es limitada y puede no incluir gran variedad de sellos que se proponga a evaluar.

Figura 55. HyTest: Selección del sello



Al oprimir el botón “consultar”, la aplicación realiza una búsqueda en su base de datos según los criterios seleccionados y sugiere la presión de trabajo y torque máximo a aplicar. Estos valores pueden ser cambiados directamente por el usuario o ser introducidos directamente, ya sea porque el sello a utilizar no está registrado en la base de datos, o los valores son previamente conocidos y no se desea realizar la búsqueda.

Estos dos valores, Presión de Trabajo y Torque máximo, son los que determinarán el procedimiento de la prueba a realizar. A partir de la presión de trabajo se aumenta en 1.4 veces el valor para asignar la magnitud de la presión de prueba, mientras con el torque máximo se determinan las etapas de aplicación de torque. Puesto que el valor tabulado es el torque máximo, este se multiplica por un factor de 0.75 para generar el torque total a aplicar, con el fin de tener un factor de seguridad y no llevar la junta a condiciones críticas de esfuerzos por el torque aplicado.

Figura 56. HyTest: Presión y torque para la prueba

The screenshot shows the 'CONFIGURACION PRUEBA' window with the following data:

Tipo Brida	Class	NPS	Temperatura de trabajo	Tipo Sello
RF	Class150	1 1/2	100 °F / 38 °C	PTFE Multiexpandido

Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
9	14	27	45

Presión de Trabajo [Psi]	Torque Máximo [Lbf - Ft]
275	60

Presión de Prueba [Psi]	Duración [Horas]
385	24

Para realizar la prueba a un sello no caracterizado, el software ofrece la posibilidad de calcular el torque de forma manual, a partir del procedimiento descrito en la sección 6.1, la aplicación determina el torque máximo y mínimo, y al volver lo ubica en la casilla de torque máximo de la ventana anterior, para determinar las etapas de aplicación del torque.

Figura 57. HyTest: Cálculo de torque

The screenshot shows the 'Cálculo de torque' window with the following data:

Diámetro Externo de Contacto de [in]	Diámetro Interno de Contacto di [in]	Sy Sello [Psi]	Presión mínima de aplastamiento y [psi]	Factor de Junta m
2.875	1.91	15000	4800	2

Presión de Trabajo [Psi]	Diámetro Nominal Perno [in]	# Pernos	Sy Perno [Psi]	Factor de Fricción k
285	0.5	4	100000	0.2

Torque min [Lb-ft]	Torque max [Lb-ft]
36	113

Una vez fijados los valores de torque, sus etapas y la presión de prueba, se procede con la realización de la misma. HyTest exige una conexión a una tarjeta Arduino previamente cargada con el programa elaborado exclusivamente para trabajar con HyTest. En la parte superior se muestran los parámetros principales de la prueba a realizar, entre esos se destaca el tiempo de la misma, el cual por defecto es 24 horas, pero puede ser modificado antes de comenzar la prueba. Una vez que la plataforma Arduino ha detectado la conexión con HyTest, se procede a configurar el intervalo de tiempo de adquisición de datos y con ello la aplicación comienza a registrar y guardar los datos de presión y temperatura, a la vez que realiza una gráfica guía en la ventana de control, con el eje vertical derecho y en color azul registrando la presión; el eje vertical izquierdo con color rojo la temperatura promedio del ambiente.

Figura 58. HyTest: Registro de datos



Cuando el tiempo de la prueba sea cumplido el programa lo comunicará y tendrá un texto confirmándolo. El usuario podrá continuar la prueba por tiempo indefinido si

así lo desea, al igual que podrá dar por terminada la prueba en el momento que lo considere.

Al terminar la prueba y haber dejado de recibir datos, toda la información obtenida, estará momentáneamente guardada en la memoria interna del software. Para evitar perder estos datos, HyTest permite exportar los datos a un archivo de Excel donde pueden ser manipulados y organizados para su posterior análisis.

## 8. CONCLUSIONES

- Se diseñaron procedimientos de pruebas hidrostáticas basados en estándares aceptados a nivel mundial, lo cuales son lo suficientemente sencillos y prácticos para ser aplicados en las instalaciones de la empresa o prestar un servicio en locaciones que impliquen un desplazamiento del equipo gracias a su tamaño y forma de operación.
- Se comprobó que las pruebas son reproducibles y certeras teniendo en cuenta la comparación de los resultados con productos certificados. Sin embargo el sistema y procedimientos desarrollados son solo aproximaciones a las normas, por tanto no pueden ser garantía de cumplir a cabalidad los criterios impuestos por esta. Sin embargo, el sistema puede garantizar el comportamiento en las situaciones simuladas durante las pruebas.
- El desarrollo del software HyTest se convirtió en una mejor herramienta control y generación de un algoritmo de trabajo, que mantener extensas formulas y formularios de registro durante una prueba realizada. Su implementación garantiza que los datos y tiempo son exactos y se calculan siempre de la misma manera.
- Debido al costo de las bridas, tener todos los pares necesarios para completar los grupos descritos en el contenido representa una inversión considerable, sin embargo no es esencial disponer de todos ellos para el funcionamiento del sistema y se pueden ir adquiriendo a medida que la necesidad lo amerite.
- Los resultados obtenidos en los procedimientos realizados brindan una caracterización a un sello determinado, y su uso estará sujeto a las características del sistema a utilizar. Por lo tanto una prueba realizada, no necesariamente limita o excluye el uso del sello de todas las aplicaciones.

## 9. RECOMENDACIONES

- Los procedimientos y pruebas desarrolladas deben ser estudiados y complementados a medida que se adquiera la experiencia de trabajo con estas. A medida que sean aplicados los procedimientos, se tendrá el criterio para ajustar aún más estos a las necesidades propias del caso.
- El software desarrollado, HyTest, debe comenzar su planteamiento de desarrollo de una siguiente versión complementando las bases de datos existentes y adicionando módulos de cálculo al usuario, lo cual permita que el proceso sea más sencillo e intuitivo de desarrollar.
- Se propone que en la siguiente versión del software desarrollado, se implementen secuencias que dirijan paso a paso las pruebas a desarrollar, lo cual permita al operario seguir instrucciones claras, de formas que las pruebas siempre se realicen de la misma manera.

## BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for sealability of sheet, composite, and solid form-in-place gasket materials. F2378. New York: El Autor, 2011. 6 p.

ARDUINO. Learning [Online]. [cited 8 nov, 2014] Available from internet:<URL: <http://arduino.cc/en/Reference/HomePage>>

CARVALHO VEIGA, José Carlos. Juntas Industriales. Rio de Janeiro: Brasil form Chesterman, 2003. 235 p.

ENPRO INDUSTRIES. Garlock Metallic Gasket Catalog. s.l.:El Autor. 46p

GUAZZARONI, Cesar. Cinco termómetros a la vez con Arduino [online]: 28 Abril 2013 [cited 10 de Diciembre 2014]. Available from Internet: <<http://espaciodecesar.com/2013/04/28/cinco-termetros-a-la-vez-con-arduino/>>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá DC: El Instituto, 2008. 42p.

-----Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá DC: El Instituto, 1998.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Referencias bibliográficas: Contenido, forma y escritura. NTC 5613. Bogotá DC: El Instituto, 2008. 38p.

MICROSOFT. Microsoft developer network [Online]. [cited 20 dic, 2014] Available from internet:< URL: <https://msdn.microsoft.com/library/vstudio>>

MIRAGE, Portable Performance, ASKERS, Esther. A Guide to Three Common Types of Flange Faces [online]: Inglaterra [cited 10 de Diciembre 2014]. Available from internet: <<http://blog.miragemachines.com/a-guide-to-three-common-types-of-flange-faces>>

U.S. PIPE. Full Face Flange-Tyte Gasket [online]. 2010 Edition [cited 13 dic, 2014]. Available from Internet: <<http://www.uspipe.com/upload/products/ductile-iron-pipe/ductile-iron-flanged-pipe-and-fittings/20117201020270.Full%20Face%20Flange-TYTE%20Gaskets%20BRO-023.pdf>>

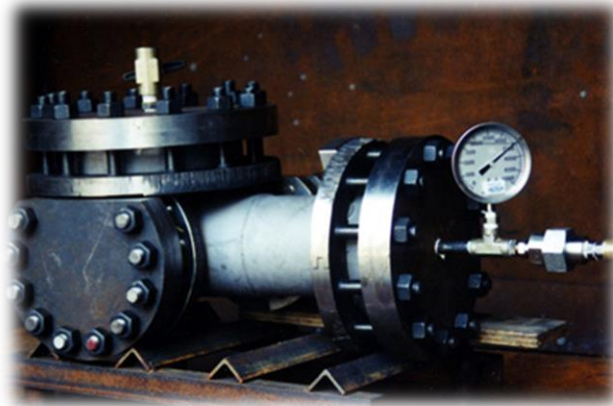
THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Nonmetallic flat gaskets for pipe flanges. B16.21. New York: El Autor, 2005. 22 p.

----- . Pipe Flanges and Flanged Fittings. B16.5. New York: El Autor, 2009. 226 p.

THE WEATHER CHANNEL. Bucaramanga, Colombia Weather [online], [cited 15 dic, 2014]. Available from Internet <<http://www.weather.com/weather/weekend/I/COXX0005:1:CO>>

**ANEXO A**  
**BANCOS DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS EN LA INDUSTRIA**

➤ **Prueba hidrostática para inspección de fundición**



FUENTE: Advex Corporation

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Diseño compacto	Bridas con forma particular
Posibilidad de realizar 4 pruebas al mismo tiempo	En caso de fallar un sello, no se puede aislar el fallo para continuar con la prueba
Estabilidad del bastidor	

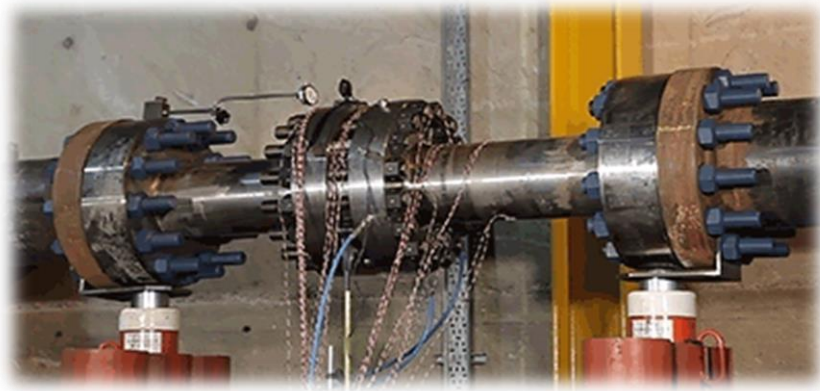
➤ **Prueba hidrostática para medidor Venturi**



FUENTE: Experflow Measurements Inc

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Diseño compacto	Inestabilidad del bastidor
Posibilidad de realizar 4 pruebas al mismo tiempo y control de presión	Necesidad de soldadura en el montaje
Sistema de entrada de presión sencillo	Imposibilidad de aislar una sección de las otras en caso de fallo

➤ **Montaje de sistemas de tuberías submarinas (ISO 13628)**



FUENTE: Vector technology group

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Sistema de sujeción al bastidor estable y seguro	Diseño robusto y difícil de transportar
Disposición con posibilidad de 4 sellos a la vez	Imposibilidad de aislar una sección de las otras en caso de fallo
Sistema de entrada de presión sencillo	

➤ **Sistema de pruebas hidrostáticas de estanqueidad**



FUENTE: Principia corporation S.A.C.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Sistema de entrada de presión manual	Diseño grande y robusto
Acoples de fácil montaje y manipulación en la entrada de presión	Solo para pruebas de tanques y elementos similares, imposibilidad de realizar pruebas de sellos para bridas
Control de la presión en el sistema	

## ANEXO B

### TORQUE RECOMENDADO: GARLOCK COMPRESSED SHEET AND GYLON

**RECOMMENDED TORQUE PER BOLT**  
(ft-lbs.)

The following table is for Standard Raised Face Flanges ANSI B16.5  
with ASTM A193 B7 bolts and A194 2H nuts

**Material: Compressed Sheet and PTFE Gaskets**

Flange Size	Class 150		Class 300		Class 400		Class 600	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
1/2	9	28	12	28	13	28	18	28
3/4	13	40	21	51	24	51	32	50
1	17	53	28	67	33	67	42	67
1 1/4	26	60	43	102	50	102	64	102
1 1/2	35	60	64	151	74	151	95	151
2	69	120	46	108	53	108	68	108
2 1/2	81	120	60	141	70	141	88	141
3	119	120	88	200	102	200	130	200
3 1/2	66	120	99	200	132	267	167	267
4	84	120	125	200	167	320	212	320
5	117	200	156	200	208	320	308	490
6	148	200	131	200	175	320	259	413
8	200	200	205	320	276	490	385	614
10	188	320	219	490	277	562	389	621
12	250	320	319	710	407	824	413	659
14	317	490	287	652	364	719	493	786
16	301	490	401	912	505	997	604	964
18	448	710	439	1000	556	1127	942	1503
20	395	710	484	1000	593	1201	866	1381
24	563	1000	662	1552	1018	2064	1482	2365

Above values are valid only if the following conditions are met:  
Flanges according to ASME B16.5 norm  
**New bolts**, material ASTM A193-B7, **lubricated** with molybden based grease  
Gasket dimensions according to ASME B16.21  
Torque has to be applied in steps according to PCC1 procedure, **never in one single step.**

**ASME PCC1-PROCEDURE**  
**Installation.** Tighten the bolts by hand. Bigger bolts may require the use of a torque wrench, in this case tighten to 20% of target torque. Make sure that the flanges are aligned and parallel measuring in four point, angle distance 90°.

**Step 1.** tighten each bolt to 30% of target torque using cross pattern. Make sure that flanges remain parallel after each tightening.  
**Step 2.** tighten each bolt to 60% of target torque using cross pattern.  
**Step 3.** tighten each bolt to 100% of target torque using cross pattern.  
**Step 4.** continue tightening to 100% of target torque using rotational pattern until no movement.  
**Step 5.** wait 4 hours and repeat step 4 before putting the line into operation.

Torque máximo: Valor de falla por esfuerzo de compresión del material del empaque. Torque Recomendado = 0.75 Valor de Torque Máximo.

Fuente: EnPro Industries Company

## ANEXO C

### TORQUE PARA ESFORZAR PERNOS: CATÁLOGO GARLOCK

## Torque to Stress Bolts

The torque required to produce a certain stress in bolting is dependent on several conditions, including:

- Diameter and number of threads on bolt
- Condition of nut bearing surfaces
- Lubrication of bolt threads and nut bearing surfaces.

The tables below reflect the results of many tests to determine the relation between torque and bolt stress. Values are based on steel bolts that have been well-lubricated with a heavy graphite and oil mixture.

A non-lubricated bolt has an efficiency of about 50% of a well-lubricated bolt. Also, different lubricants produce results that vary from 50% to 100% of the tabulated stress figures.

For Alloy Steel Stud Bolts (Load in pounds on stud bolts when torque load is applied)

Nominal Diameter of Bolt (inches)	Number of Threads (per inch)	Diameter at Root of Thread (inches)	Area at Root of Thread (sq. inch)	Stress					
				30,000 psi		45,000 psi		60,000 psi	
				Torque (ft lbs)	Compression (lbs)	Torque (ft lbs)	Compression (lbs)	Torque (ft lbs)	Compression (lbs)
1/4	20	0.185	0.027	4	810	6	1,215	8	1,620
5/16	18	0.240	0.045	8	1,350	12	2,025	16	2,700
3/8	16	0.294	0.068	12	2,040	18	3,060	24	4,080
7/16	14	0.345	0.093	20	2,790	30	4,185	40	5,580
1/2	13	0.400	0.126	30	3,780	45	5,670	60	7,560
9/16	12	0.454	0.162	45	4,860	68	7,290	90	9,720
5/8	11	0.507	0.202	60	6,060	90	9,090	120	12,120
3/4	10	0.620	0.302	100	9,060	150	13,590	200	18,120
7/8	9	0.731	0.419	160	12,570	240	18,855	320	25,140
1	8	0.838	0.551	245	16,530	368	24,795	490	33,060
1-1/8	8	0.963	0.728	355	21,840	533	32,760	710	43,680
1-1/4	8	1.088	0.929	500	27,870	750	41,805	1,000	55,740
1-3/8	8	1.213	1.155	680	34,650	1,020	51,975	1,360	69,300
1-1/2	8	1.338	1.405	800	42,150	1,200	63,225	1,600	84,300
1-5/8	8	1.463	1.680	1,100	50,400	1,650	75,600	2,200	100,800
1-3/4	8	1.588	1.980	1,500	59,400	2,250	89,100	3,000	118,800
1-7/8	8	1.713	2.304	2,000	69,120	3,000	103,680	4,000	138,240
2	8	1.838	2.652	2,200	79,560	3,300	119,340	4,400	159,120
2-1/4	8	2.088	3.423	3,180	102,690	4,770	154,035	6,360	205,380
2-1/2	8	2.338	4.292	4,400	128,760	6,600	193,140	8,800	257,520
2-3/4	8	2.588	5.259	5,920	157,770	8,880	236,655	11,840	315,540
3	8	2.838	6.324	7,720	189,720	11,580	264,580	15,440	379,440

For Machine Bolts and Cold Rolled Steel Stud Bolts (Load in pounds on stud bolts when torque load is applied)

Nominal Diameter of Bolt (inches)	Number of Threads (per inch)	Diameter at Root of Thread (inches)	Area at Root of Thread (sq. inch)	Stress					
				7,500 psi		15,000 psi		30,000 psi	
				Torque (ft lbs)	Compression (lbs)	Torque (ft lbs)	Compression (lbs)	Torque (ft lbs)	Compression (lbs)
1/4	20	0.185	0.027	1	203	2	405	4	810
5/16	18	0.240	0.045	2	338	4	675	8	1,350
3/8	16	0.294	0.068	3	510	6	1,020	12	2,040
7/16	14	0.345	0.093	5	698	10	1,395	20	2,790
1/2	13	0.400	0.126	8	945	15	1,890	30	3,780
9/16	12	0.454	0.162	12	1,215	23	2,340	45	4,860
5/8	11	0.507	0.202	15	1,515	30	3,030	60	6,060
3/4	10	0.620	0.302	25	2,265	50	4,530	100	9,060
7/8	9	0.731	0.419	40	3,143	80	6,285	160	12,570
1	8	0.838	0.551	62	4,133	123	8,265	245	16,530
1-1/8	7	0.939	0.693	98	5,190	195	10,380	390	20,760
1-1/4	7	1.064	0.890	137	6,675	273	13,350	545	26,700
1-3/8	6	1.158	1.054	183	7,905	365	15,810	730	31,620
1-1/2	6	1.283	1.294	219	9,705	437	19,410	875	38,820
1-5/8	5-1/2	1.389	1.515	300	11,363	600	22,725	1,200	45,450
1-3/4	5	1.490	1.744	390	13,080	775	26,160	1,550	52,320
1-7/8	5	1.615	2.049	525	15,368	1,050	30,735	2,100	61,470
2	4-1/2	1.711	2.300	563	17,250	1,125	34,500	2,250	69,000

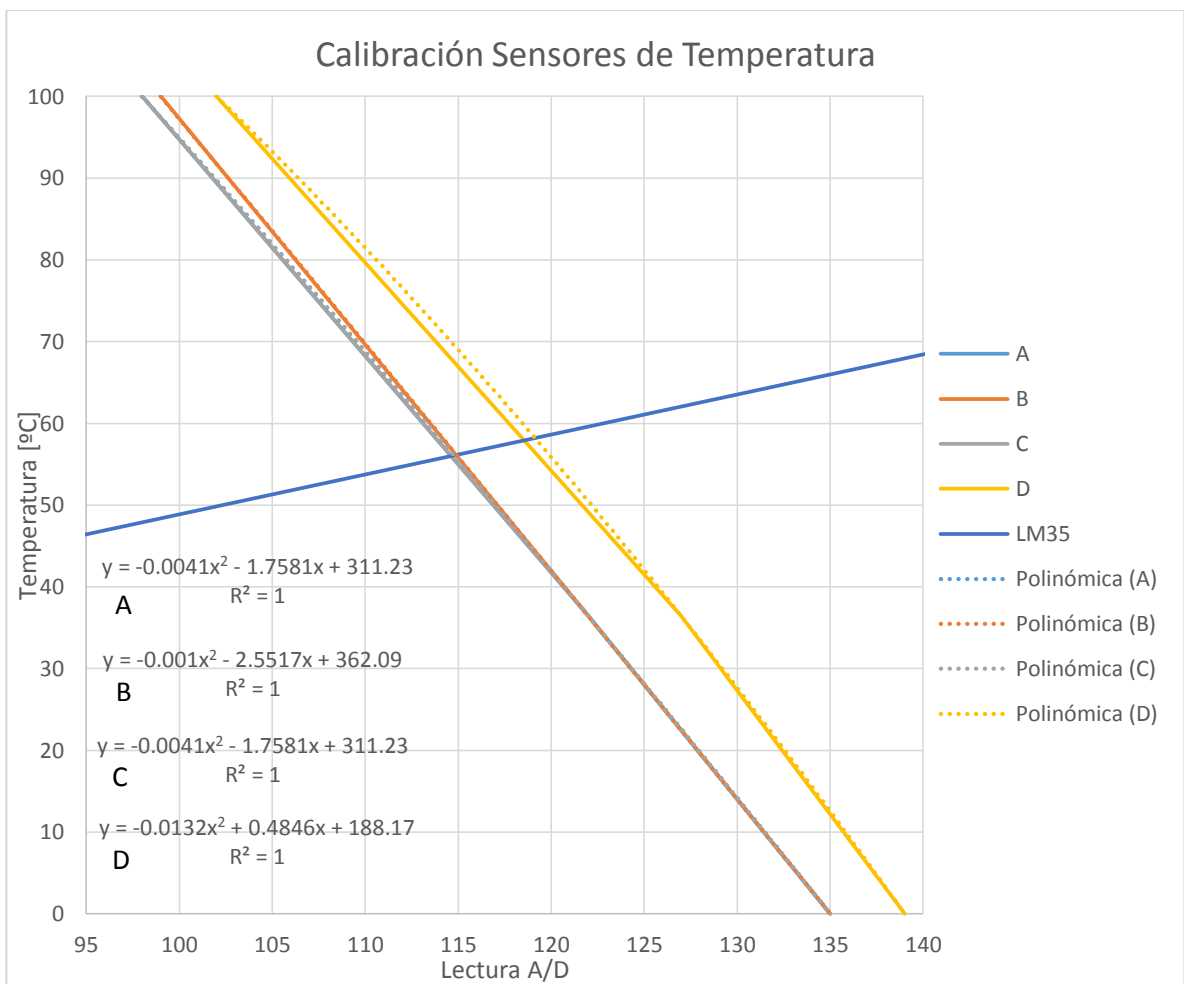
Fuente: ENPRO INDUSTRIES. Garlock Metallic Gasket Catalog. s.l.:El Autor. 46p

## ANEXO D

### CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

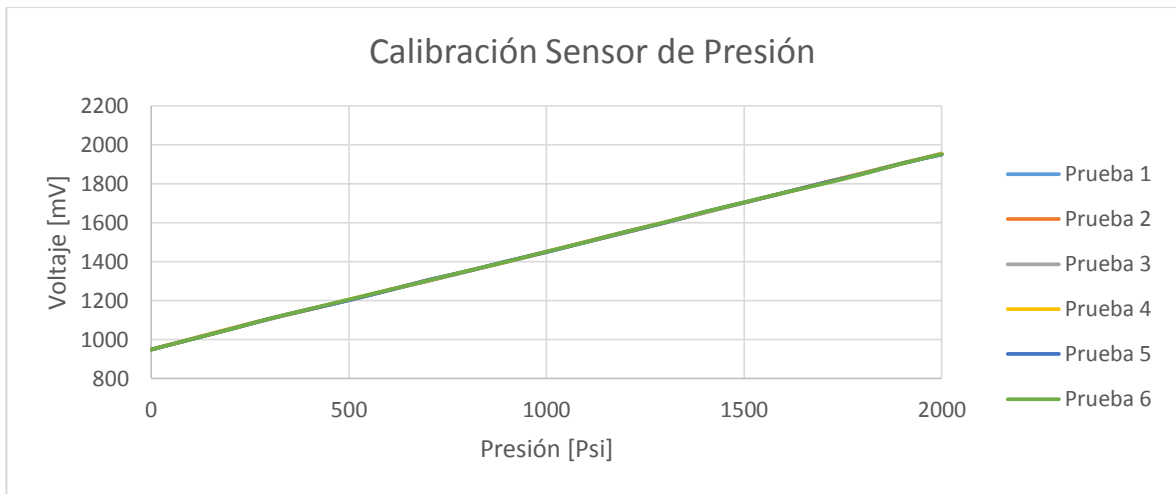
#### ➤ Calibración termómetros

Los sensores de temperatura construidos, fueron calibrados a partir de los valores registrados del conversor análogo digital por el sensor lineal LM35 a temperaturas determinadas y con los valores registrados por los sensores a las temperaturas utilizadas. Con ayuda de software Excel, se graficó una línea de tendencia polinómica de orden 2, que se acercara a la gráfica original, con el fin de obtener una ecuación para cada sensor, y así a partir del promedio obtenido, determinar la temperatura alrededor del sistema de pruebas.

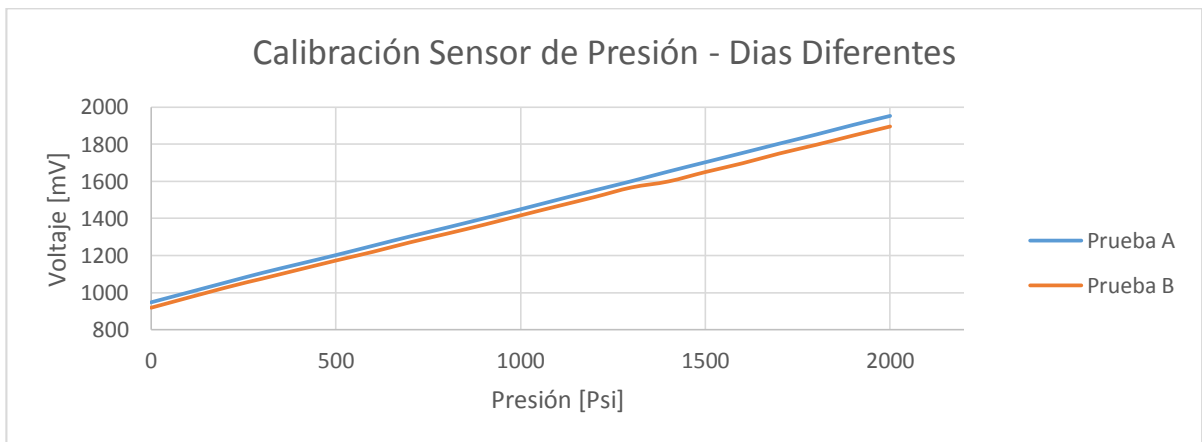


### ➤ Sensor de presión Wika A10

En el proceso de calibración del transductor de presión utilizado, se realizaron 6 pruebas, variando la presión entre 200 Psi y 2000 Psi, y registrando el voltaje enviado por el sensor. A partir de estos datos, se obtuvo la siguiente gráfica. Aunque aparenta verse una única línea, los otros segmentos que representan las pruebas realizadas, se encuentran atrás de la línea. El sensor tiene una linealidad con una desviación del 2%, lo cual hace su lectura sencilla y práctica.



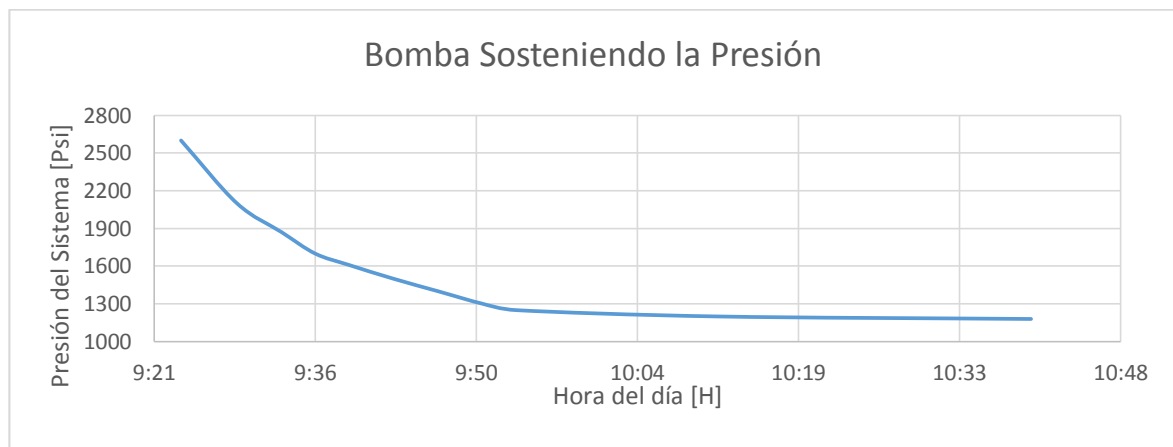
Sin embargo, en días posteriores se realizaron pruebas nuevamente, y se notó que aunque la linealidad permanece, y la diferencia de voltaje cada 100 Psi (pendiente) se mantiene relativamente constante, se determinó que el ruido eléctrico y condiciones ambientales, cambian el punto de presión 0 de referencia.



De esta forma, se encontró que el cambio de voltaje por cada 100 Psi es de  $\approx 48\text{mV}$  equivalentes al valor 10 en el conversor análogo digital (solo números enteros). Teniendo en cuenta el mínimo de mV que se pueden medir debido a la resolución del conversor análogo digital de la tarjeta Arduino es de  $4.88\text{ mV}$

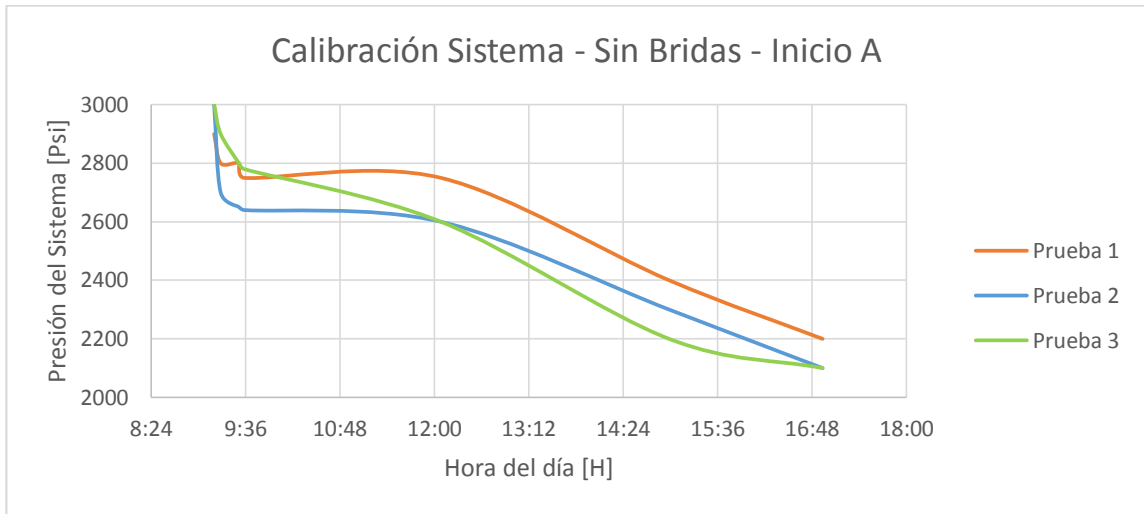
### ➤ Válvula – Manómetro – Sensor – Bomba

Como prueba inicial, se procedió a presurizar el sistema, manteniendo la presión de este con la bomba manual que suministra la presión. Como era de esperarse, la presión comenzó a descender y en poco menos de 30 minutos, había caído en más del 50% del valor inicial. Esta prueba sirvió de control y comprobación, de la imposibilidad de la bomba de mantener la presión de un sistema.



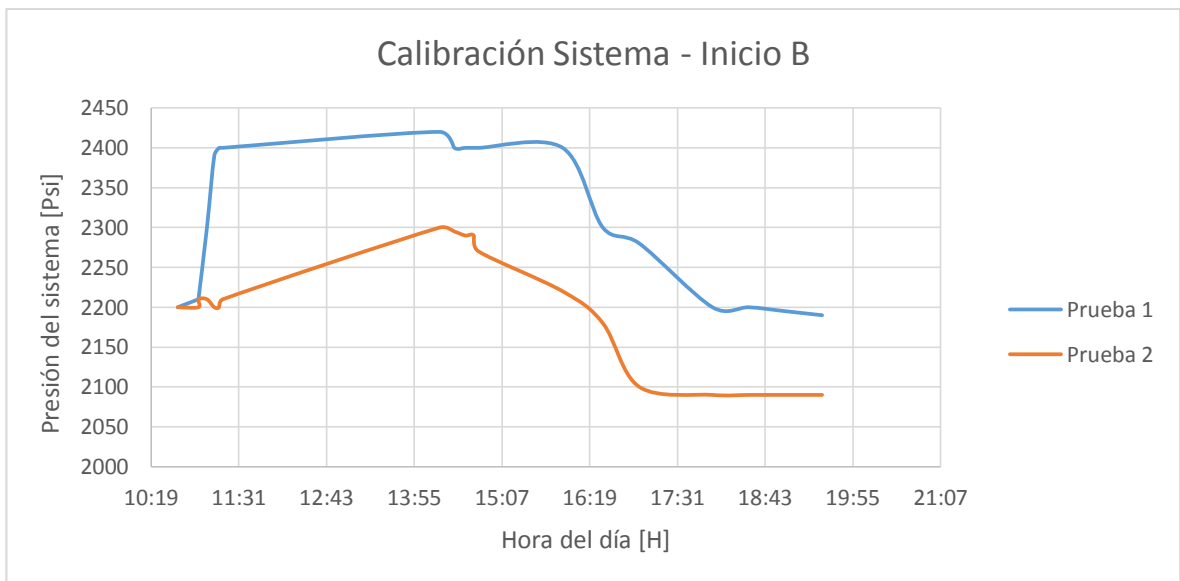
Se realizaron 3 pruebas (una por día) bajo un procedimiento que se llamó “Inicio A”. Este consiste en presurizar el sistema cerrar la válvula de entrada, y despresurizar la bomba. Se graficaron los resultados obtenidos, notando que la tendencia siempre fue similar.

En la prueba 2, se obvió el procedimiento correcto de purga y se notó que la presión descendió rápidamente al presurizar el sistema, debido a burbujas de aire atrapadas en el sistema, las cuales al salir, dejan un volumen disponible para ser ocupado por el fluido de prueba y por lo tanto aliviar la presión interna.



Posteriormente, en vista de la tendencia de caída de presión, se procedió a inspeccionar las uniones y acoples, en busca de fugas. Al no hallarse rastro de fuga, se reconectaron los acoples y se realizó una prueba de control, viéndose que la tendencia era igual.

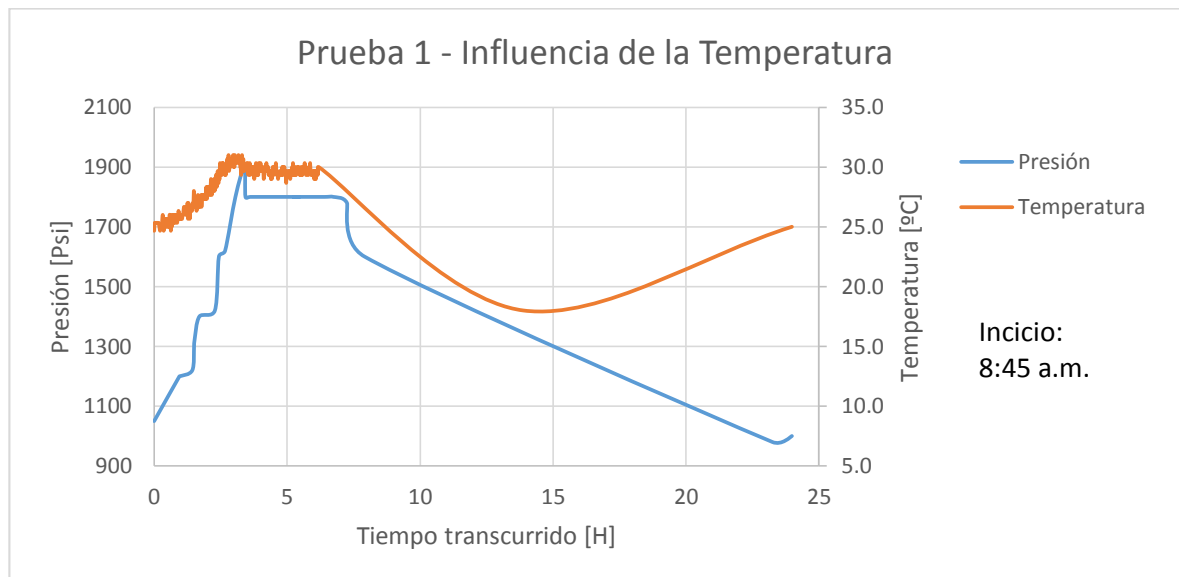
Debido a esto, se ideó un procedimiento que se llamó “Inicio B”, el cual es: Presurizar el sistema por medio de la bomba, cerrar la válvula de entrada de presión, despresurizar la bomba 30 minutos después de haberse cerrado la válvula.



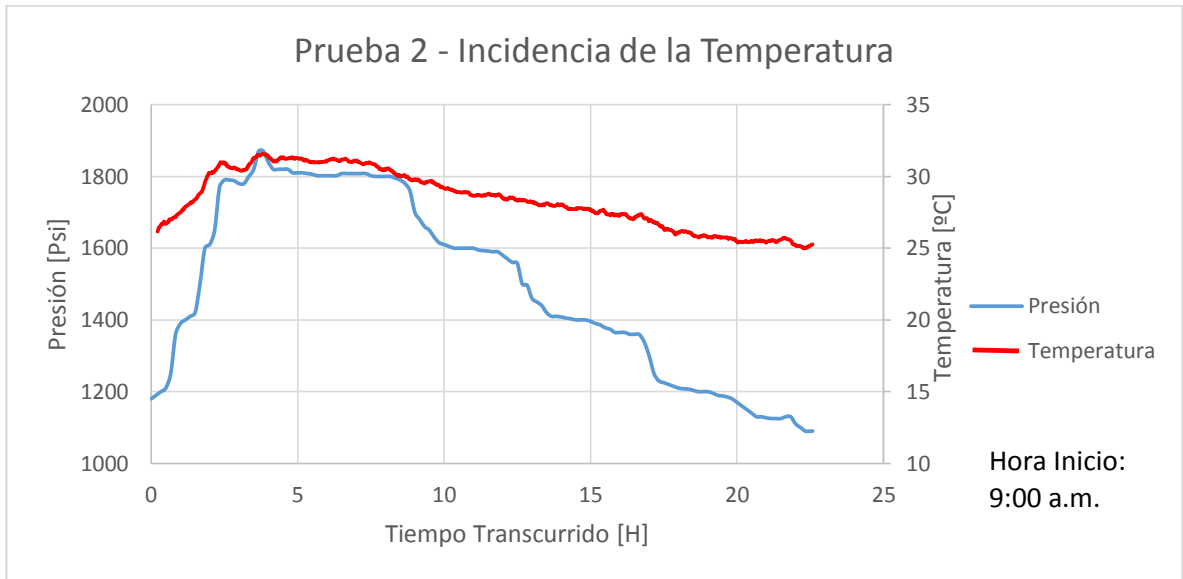
Al comparar las curvas de presión obtenidas bajo este procedimiento con el anterior (Inicio B vs Inicio A) se puede apreciar la gran diferencia del comportamiento de la presión. Se estableció que es necesario mantener durante un tiempo la presión en ambos lados de la válvula justo después de cerrarla, de esta forma la presión en ambos costados se anulan, mientras la válvula se asienta totalmente.

Aunque la presión se mantuvo aplicando el “Inicio B”, se pudo notar variaciones de la presión, y una ligera tendencia a la baja al final de la prueba realizada. Notando la hora del día en que la presión tuvo una tendencia a subir, se consideró que la temperatura del ambiente es un factor que no debe ser descartado, puesto que aparenta tener una influencia apreciable.

Debido a esto, se procedió a realizar dos pruebas de 24 horas, con el fin de confirmar la influencia de la temperatura en los cambios de presión en el sistema. Con lo cual se obtuvieron las siguientes gráficas:



Durante la prueba 1, lamentablemente, se presentaron inconvenientes con el sistema de adquisición de datos, por lo tanto los datos entre las 8 horas transcurridas y las 22 horas transcurridas, no son confiables, y deben ser obviados.



A partir de los datos obtenidos, se pudo notar que la temperatura del ambiente alrededor del sistema es un factor crítico que debe ser registrado y tomado en cuenta al momento de analizar los datos, esto se determina al observar la tendencia de cambio de las dos variables, las cuales son similares. Se vio que un cambio de 5 °C en el ambiente circundante, puede representar alrededor de un cambio de 500 Psi en la presión del sistema. Se recuerda que estas pruebas de calibración no incluyen bridas o sellos hidráulicos.

## ANEXO E

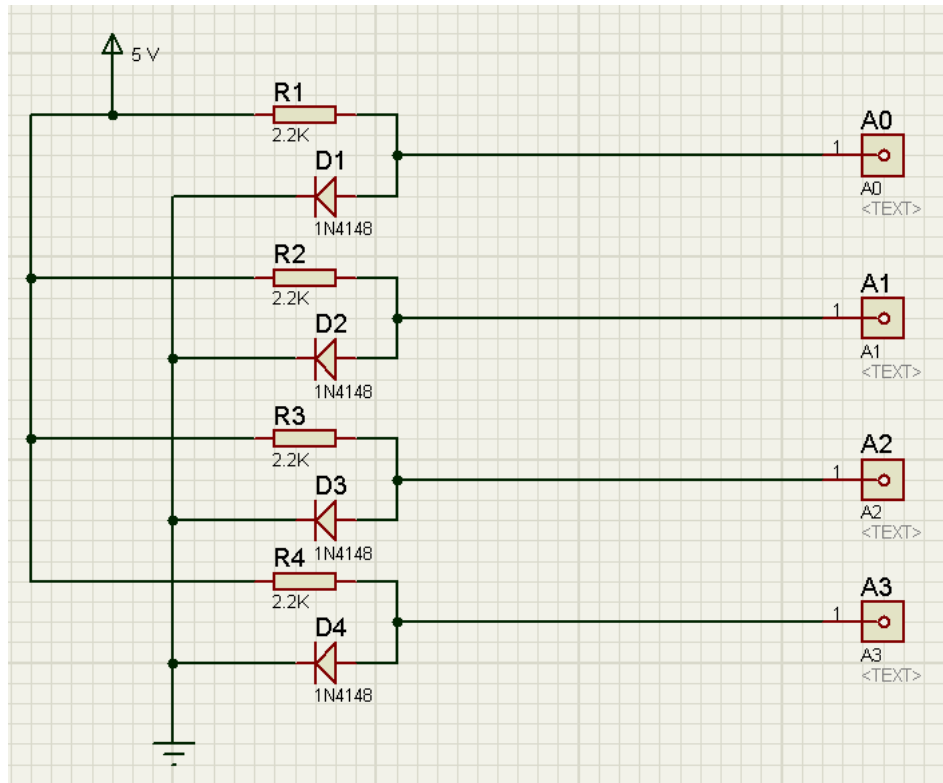
### ELEMENTOS Y ACCESORIOS PARA EL SISTEMA DE PRUEBAS

Segmento	Elemento Necesario	Cantidad
<b>Línea de entrada</b>	Unión válvula-Bomba	1
	Válvula aguja 10.000 Psi	1
	Unión válvula Brida	1
	Brida RF 1" C150	1
	Brida RF 1" C600	1
	Brida RF 1" C1500	1
	Brida RF 1" C2500	1
	Brida RTJ 1" C150	1
	Brida RTJ 1" C1500	1
	Brida RTJ 1" C2500	1
<b>Línea de purga</b>	Válvula para purgar 10.000 Psi	1
	Unión válvula Brida	1
	Brida RF 1" C150	1
	Brida RF 1" C600	1
	Brida RF 1" C1500	1
	Brida RF 1" C2500	1
	Brida RTJ 1" C150	1
	Brida RTJ 1" C1500	1
	Brida RTJ 1" C2500	1
<b>Línea intermedia (Un juego por cada sello adicional)</b>	Válvula aguja 10.000 Psi	1
	Unión válvula-Brida	2
	Brida RF 1" C150	2
	Brida RF 1" C600	2
	Brida RF 1" C1500	2
	Brida RF 1" C2500	2
	Brida RTJ 1" C150	2
	Brida RTJ 1" C1500	2
	Brida RTJ 1" C2500	2

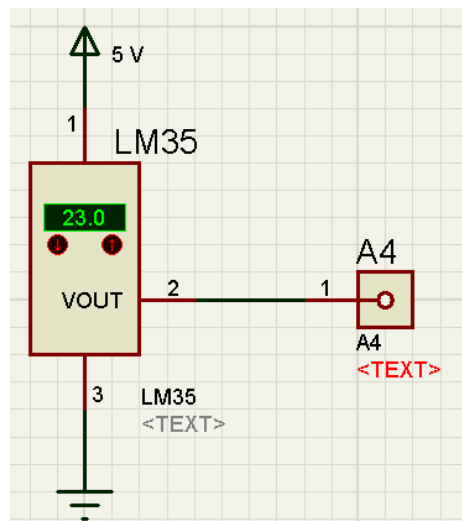
## ANEXO F

### CIRCUITOS Y CONEXIONES ELECTRÓNICAS

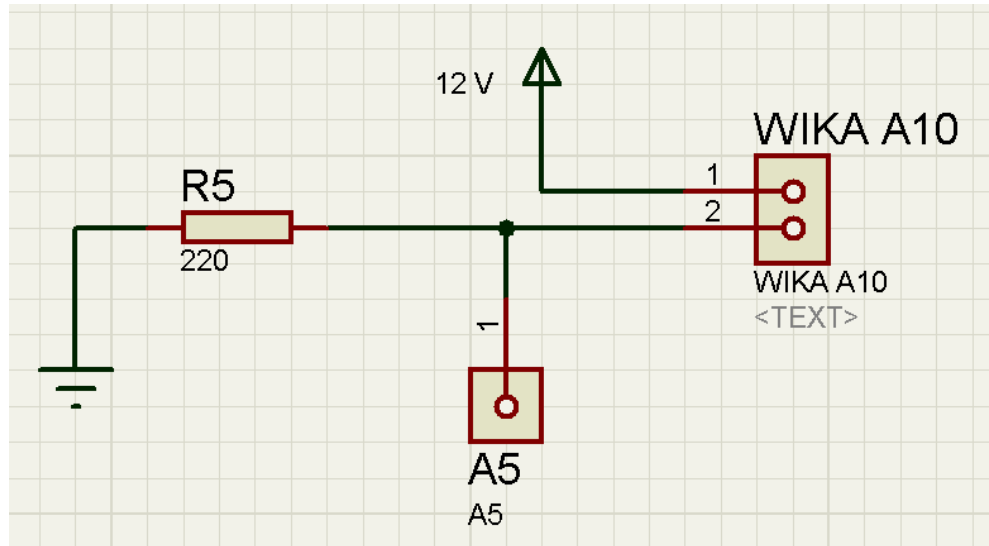
#### ➤ Sensores de temperatura



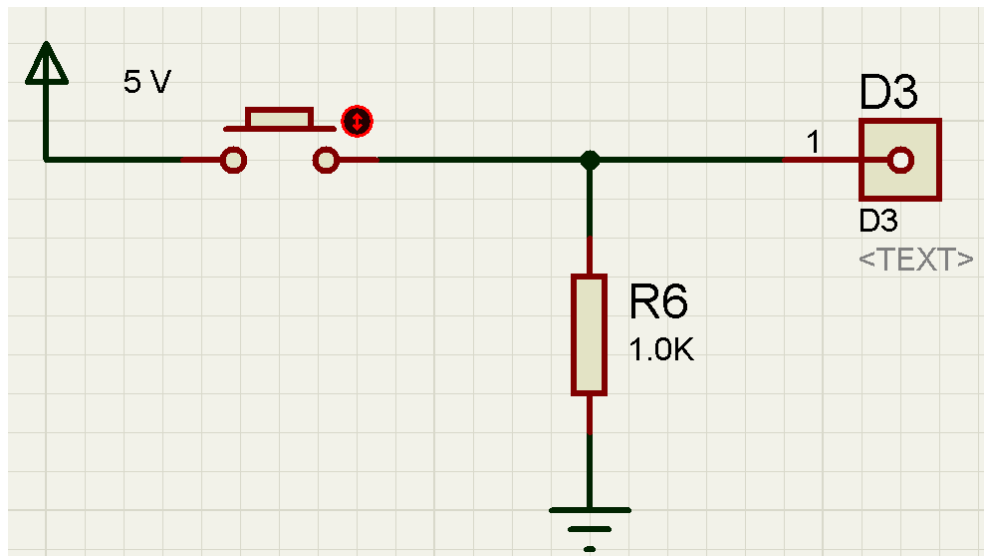
#### ➤ LM 35 – Sensor Lineal de Temperatura (10mV/°C)



➤ Transductor de Presión



➤ Pulsador de referencia Presión=0

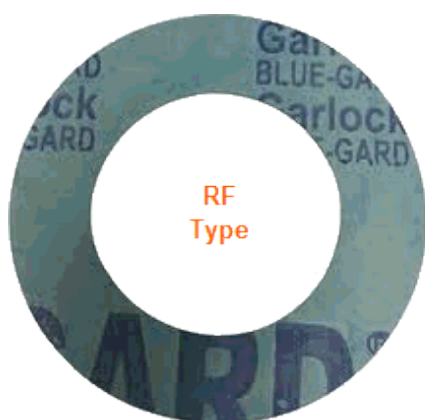


## ANEXO G

### SELLOS COMERCIALES Y NUEVOS DISEÑOS A EVALUAR

Durante el proceso de adaptación del sistema diseñado y los procedimientos elaborados, se definieron los siguientes tipos de sello hidráulico para realizar las pruebas de ajuste:

- GARLOCK BLUE-GARD STYLE – RF CLASS 150 1”



Torque recomendado: 40 Lb-ft

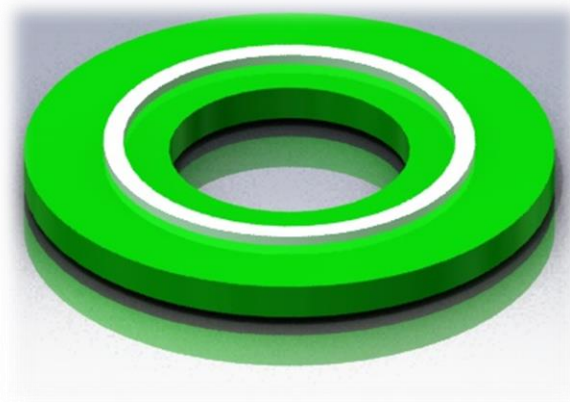
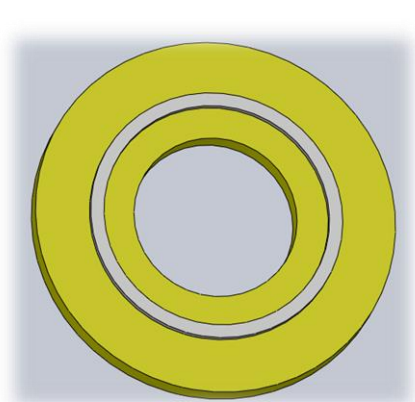
Torque mínimo: 17 Lb-ft

Torque máximo: 53 Lb-ft

Presión Máxima: 1000 Psi

Fuente: EnPro Industries Inc

- Diseño Diacor SAS – D240 y D250



Diacor se encuentra en el desarrollo de un diseño de sello hidráulico para bridas, el cual consta de un retenedor en Epoxi-Tejido de vidrio y una incrustación de PTFE (Teflón). El retenedor en Epoxi-Tejido de vidrio se pretende el cual se pretende soporte el esfuerzo de compresión ejercido por las bridas. Se están presentando dos configuraciones de este sello variando la densidad y resistencia a la compresión del retenedor Epoxi-Tejido de vidrio. Se pueden diferenciar por el color (Verde y Amarillo)



D250R

La primera configuración exitosa del diseño, se encuentra en sus fases finales de caracterización, para ser puesto en circulación en el mercado industrial.

Una de las principales características del diseño realizado, era permitir que el sello fuese implementado en bridas FF, RF y RTJ.

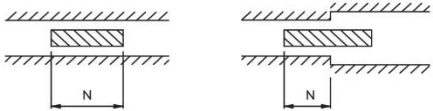
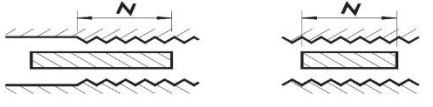
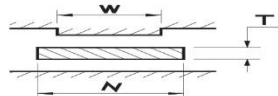

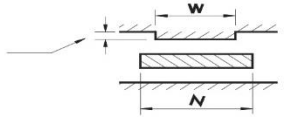
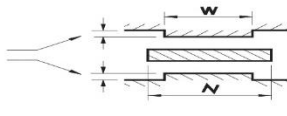
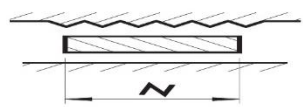
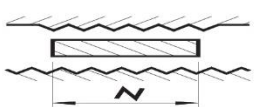
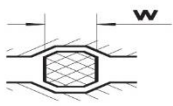
## ANEXO H

### TABLAS PARA EL CÁLCULO DE TORQUES EN BRIDAS

➤ **Factor de la junta(m) y presión mínima de aplastamiento (y)**

Material de la junta		m	(psi)	tipo	de sellado	b <sub>0</sub>
Goma –	abajo de 75 Shore A	0.50	0	plana	(1a) (1b) (1c) (1d) (4) (5)	II
	- arriba de 75 Shore A	1.00	200			
	- c/refuerzo de tela de algodón	1.25	400			
Lamina Comprimida	3.2 mm espesor	2.00	1600	plana	(1a) (1b) (1c) (1d) (4) (5)	II
	1.6 mm espesor	2.75	3700			
	0.8 mm espesor	3.50	6500			
Fibra vegetal		1.75	1100	plana	(1a) (1b) (1c) (1d) (4) (5)	II
Metalflex acero inoxidable o Monel y relleno de Amianto		3.00	10000	911, 913 914	(1a) (1b)	II
Doble camisa metálica corrugada	Aluminio	2.50	2900	926	(1a) (1b)	II
	Cobre o Latón	2.75	3700			
	Acero Carbono	3.00	4500			
	Monel	3.25	5500			
	Aceros inoxidables	3.50	6500			
Corrugada metálica	Aluminio	2.75	3700	900	(1a) (1b) (1c) (1d)	II
	Cobre o Latón	3.00	4500			
	Acero Carbono	3.25	5500			
	Monel	3.50	6500			
	Aceros inoxidables	3.75	7600			
Doble camisa metálica corrugada	Aluminio	3.25	5500	923	(1a) (1b) (1c) (1d) (2)	II
	Cobre o Latón	3.50	6500			
	Acero Carbono	3.75	7600			
	Monel	3.50	8000			
	Aceros inoxidables	3.75	9000			
Metálica ranurada	Aluminio	3.25	5500	941, 942	(1a) (1b) (1c) (1d) (2) (3)	II
	Cobre o Latón	3.50	6500			
	Acero Carbono	3.75	7600			
	Monel	3.75	9000			
	Aceros inoxidables	4.25	10100			
Metálica sólida	Aluminio	4.00	8800	940	(1a) (1b) (1c) (1d) (2) (3) (4) (5)	I
	Cobre o Latón	4.75	13000			
	Acero Carbono	5.50	18000			
	Monel	6.00	21800			
	Aceros inoxidables	6.50	26000			
Ring Joint	Acero Carbono	5.50	18000	950, 951	(6)	I
	Monel	6.00	21800			
	Aceros inoxidables	6.50	26000			

➤ Ancho efectivo de la junta

Perfil de la Superficie de Sellado	Ancho Efectivo $b_0$	
	Columna I	Columna II
(1a) 	$N / 2$	$N / 2$
(1b) 	$N / 2$	$N / 2$
(1c)  $w \leq N$	$(w + T) / 2$	$(w + T) / 2$
(1d)  $w \leq N$	$(w + N) / 4$ máx	$(w + N) / 4$ máx
(2) Resalto de 0.4 mm  $w \leq N/2$	$(w + N) / 4$	$(w + 3N) / 8$
(3) Resalto de 0.4 mm  $w \leq N/2$	$N / 4$	$3N / 8$
(4) Ver nota 1 	$3N / 8$	$7N / 16$
(5) Ver nota 1 	$N / 4$	$3N / 8$
(6) 	$w / 8$	—
<p>Ancho Efectivo de Aplastamiento de la Junta, <math>b</math>  <math>b = b_0</math> si <math>b_0 \leq 6.4</math> mm o <math>b = 0.5 ( b_0 )^{0.5}</math> si <math>b_0 &gt; 6.4</math> mm            Nota 1: cuando las ranuras no exceden en 0.4 mm de profundidad y 0.8 mm de paso usar los perfiles 1b y 1d</p>		

Fuente: CARVALHO VEIGA, José Carlos. Juntas Industriales. 2003. 235 p.

## ANEXO I

### NÚMERO DE PERNOS Y DIÁMETRO PARA BRIDAS ASME B16.5

CLASS 150		
NPS	Diámetro de Pernos	Número de Pernos
1/2	1/2	4
3/4	1/2	4
1	1/2	4
1 1/4	1/2	4
1 1/2	1/2	4
2	5/8	4
2 1/2	5/8	4
3	5/8	4
3 1/2	5/8	8
4	5/8	8
5	3/4	8
6	3/4	8
8	3/4	8
10	7/8	12
12	7/8	12
14	1	12
16	1	16
18	1 1/8	16
20	1 1/8	20
24	1 1/8	20

CLASS 300		
NPS	Diámetro de Pernos	Número de Pernos
1/2	1/2	4
3/4	5/8	4
1	5/8	4
1 1/4	5/8	4
1 1/2	3/4	4
2	5/8	8
2 1/2	3/4	8
3	3/4	8
3 1/2	3/4	8
4	3/4	8
5	3/4	8
6	3/4	12
8	7/8	12
10	1	16
12	1 1/8	16
14	1 1/8	20
16	1 1/4	20
18	1 1/4	24
20	1 1/4	24
24	1 1/2	24

CLASS 400		
NPS	Diámetro de Pernos	Número de Pernos
1/2	1/2	4
3/4	5/8	4
1	5/8	4
1 1/4	5/8	4
1 1/2	3/4	4
2	5/8	8
2 1/2	3/4	8
3	3/4	8
3 1/2	7/8	8
4	7/8	8
5	7/8	8
6	7/8	12
8	1	12
10	1 1/8	16
12	1 1/4	16
14	1 1/4	20
16	1 3/8	20
18	1 3/8	24
20	1 1/2	24
24	1 3/4	24

CLASS 600		
NPS	Diámetro de Pernos	Número de Pernos
1/2	1/2	4
3/4	5/8	4
1	5/8	4
1 1/4	5/8	4
1 1/2	3/4	4
2	5/8	8
2 1/2	3/4	8
3	3/4	8
3 1/2	7/8	8
4	7/8	8
5	1	8
6	1	12
8	1 1/8	12
10	1 1/4	16
12	1 1/4	20
14	1 3/8	20
16	1 1/2	20
18	1 5/8	20
20	1 5/8	24
24	1 7/8	24

CLASS 900		
NPS	Diámetro de Pernos	Número de Pernos
1/2	3/4	4
3/4	3/4	4
1	7/8	4
1 1/4	7/8	4
1 1/2	1	4
2	7/8	8
2 1/2	1	8
3	7/8	8
4	1 1/8	8
5	1 1/4	8
6	1 1/8	12
8	1 3/8	12
10	1 3/8	16
12	1 3/8	20
14	1 1/2	20
16	1 5/8	20
18	1 7/8	20
20	2	20
24	2 1/2	20

CLASS 1500		
NPS	Diámetro de Pernos	Número de Pernos
1/2	3/4	4
3/4	3/4	4
1	7/8	4
1 1/4	7/8	4
1 1/2	1	4
2	7/8	8
2 1/2	1	8
3	1 1/8	8
4	1 1/4	8
5	1 1/2	8
6	1 3/8	12
8	1 5/8	12
10	1 7/8	12
12	2	16
14	2 1/4	16
16	2 1/2	16
18	2 3/4	16
20	3	16
24	3 1/2	16

CLASS 2500		
NPS	Diámetro de Pernos	Número de Pernos
1/2	3/4	4
3/4	3/4	4
1	7/8	4
1 1/4	1	4
1 1/2	1 1/8	4
2	1	8
2 1/2	1 1/8	8
3	1 1/4	8
4	1 1/2	8
5	1 3/4	8
6	2	8
8	2	12
10	2 1/2	12
12	2 3/4	12

Fuente: THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Pipe Flanges and Flanged Fittings. B16.5. New York: El Autor, 2009. 226 p.

## ANEXO J

### FACTOR DE FRICCIÓN PARA PERNOS EN ACERO

➤ **Tornillos o pernos en acero o acero con aleaciones**

Diámetro Nominal pul	Filetes por pulgada	Factor de Fricción k	Área de la raíz de la rosca mm <sup>2</sup>
1/4	20	0.23	17
5/16	18	0.22	29
3/8	16	0.18	44
7/16	14	0.19	60
1/2	13	0.20	81
9/16	12	0.21	105
5/8	11	0.19	130
3/4	10	0.17	195
7/8	9	0.17	270
1	8	0.18	355
1 1/8	7	0.20	447
1 1/4	7	0.19	574
1 3/8	6	0.20	680
1 1/2	6	0.18	834
1 5/8	5 1/2	0.19	977
1 3/4	5	0.20	1125
1 7/8	5	0.21	1322
2	4 1/2	0.19	1484

Fuente: CARVALHO VEIGA, José Carlos. Juntas Industriales. 2003. 235 p.

## ANEXO K

### ALGORITMOS Y FORMATOS DE PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN

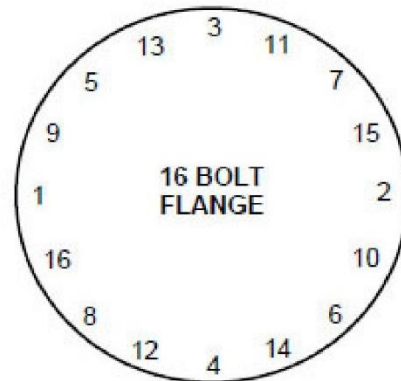
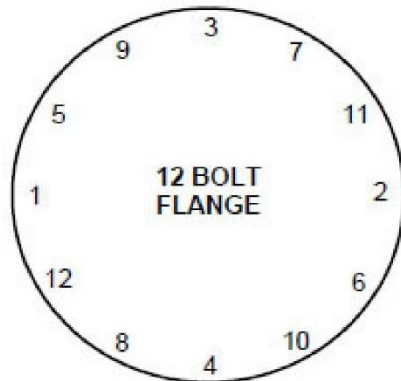
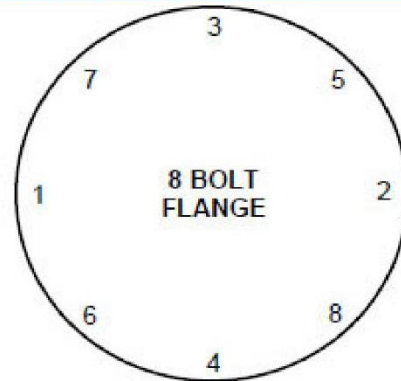
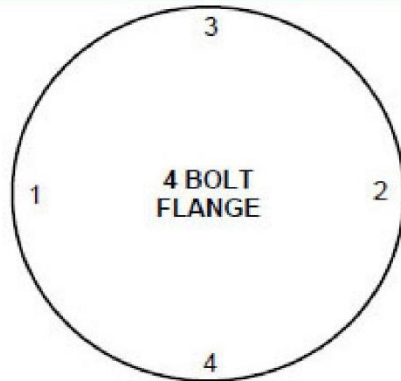
Los documentos presentados a continuación, son directrices que guían la realización de las pruebas y la caracterización de los sellos hidráulicos.

MONTAJE DE UNIÓN BRIDADA Y SELLO HIDRÁULICO	
1	Limpiar totalmente las superficies de las bridas que entraran en contacto con el sello, eliminando cualquier rastro de suciedad, partículas sólidas o líquidas.
2	Igualmente realizar el paso anterior con el sello a utilizar
3	Ubicar el sello su sitio correspondiente sobre una de las bridas. Asegurarse que las dimensiones del sello sean las adecuadas para el tipo y clase de brida utilizada.
4	Ubicar la otra brida sobre el sello. Procurar que el sello se encuentra concéntrico respecto a la brida.
5	Limpiar los pernos, y retirar cualquier tipo de material particulado de los filetes del mismo. Un perno que presente signos de corrosión, preferiblemente deberá ser reemplazado. Los pernos pueden ser lubricados con grafito.
6	Ubicar los pernos en sus posiciones e ir apretando las tuercas a mano, a ambos lados de las bridas, hasta que comiencen a ajustar levemente sobre el sello las caras de las bridas, en la medida de lo posible manteniendo una simetría en el eje vertical del perno.
7	Ir realizando el ajuste siempre en el patrón de cruz registrado en la norma ASME PCC1. Si en este punto el sello no está centrado, o presenta inconvenientes a la vista, es posible desmontar y comenzar nuevamente.
8	Una vez consultado y/o calculado el torque final de apriete, tener en cuenta que este se aplica por etapas y con el patrón de cruz, nunca en un solo paso.
9	Ajustar todos los pernos hasta el 30% el torque final respetando el patrón en cruz.
10	Procurar no ajustar más de media vuelta en un solo perno. Si este gira más de media vuelta y no ha alcanzado el valor del paso, continuar con el siguiente, y repetir el proceso si es necesario
11	Repetir los pasos anteriores ajustando los pernos hasta el 60% del torque final respetando el patrón de cruz
12	Ajustar los pernos hasta el 100% del torque final respetando el patrón de cruz
13	Confirmar y ajustar los pernos al 100% del valor del torque final, esta vez en sentido circular
14	Esperar al menos 4 horas y repetir el paso anterior ajustando los pernos en un patrón circular

**Presión de trabajo por Class [Psi]**

Temp °F	Class						
	150	300	400	600	900	1500	2500
-20 a 100	285	740	985	1 480	2 220	3 705	6 170
200	260	680	905	1 360	2 035	3 395	5 655
300	230	655	870	1 310	1 965	3 270	5 450
400	200	635	845	1 265	1 900	3 170	5 280
500	170	605	805	1 205	1 810	3 015	5 020
600	140	570	755	1 135	1 705	2 840	4 730
650	125	550	730	1 100	1 650	2 745	4 575
700	110	530	710	1 060	1 590	2 655	4 425
750	95	505	675	1 015	1 520	2 535	4 230
800	80	410	550	825	1 235	2 055	3 430
750	65	320	425	640	955	1 595	2 655
900	50	230	305	460	690	1 150	1 915
950	35	135	185	275	410	685	1 145
1000	20	85	115	170	255	430	715

**PATRÓN EN CRUZ PARA APRIETE DE PERNOS**



<b>APLICACIÓN DE PRUEBA DE GOTEO</b>	
1	Realizar el procedimiento a una temperatura ambiente de entre 20°C y 30°C. Si se realiza a una temperatura diferente, se debe aclarar y registrar
2	Realizar una medición dimensional y del peso del sello a evaluar. Registrarlos en el formato correspondiente. Ver anexo K
3	Registrar el tipo y clase de brida a usar
4	Realizar el montaje común del sello, teniendo en cuenta el torque recomendado a aplicar o calculandolo si es necesario. Registrar el valor de las etapas.
5	Ubicar un recipiente de medición de volumen vacío y limpio, en la parte inferior de la unión brida-sello-brida
6	Aplicar la presión de trabajo del sello y cerrar la válvula de entrada de presión. Registrar la presión en el formato
7	Esperar 30 minutos y realizar una inspección visual. Si no existe goteo a la vista, despresurizar la bomba y esperar 30 minutos adicionales con el sistema presurizado. De lo contrario, despresurizar el sistema. Registrar la información
8	Si no existe goteo visual después de 30 minutos, realizar la misma inspección cada 30 minutos, hasta un máximo de 2 horas. Si al cabo de este tiempo aún no existe goteo a la vista, despresurizar el sistema. Realizar el registro cara 30 minutos.
9	Una vez despresurizado el sistema, ya sea porque se alcanzaron las 2 horas, o porque se identificó un goteo, desmontar el sello. Registrar la presión antes de despresurizar.
10	Limpiar y secar el sello, evitar presionarlo demasiado.
11	Pesar y medir el sello, Registrar los datos
12	Si hubo goteo, medir el volumen recogido y con el tiempo transcurrido determinar el flujo volumétrico de goteo.
<b>APLICACIÓN EN SELLOS NO CARACTERIZADOS</b>	
1A	Realizar el montaje del sello según el procedimiento existente, al mínimo valor de torque de apriete determinado bajo los cálculos de torque.
2A	Anotar y registrar los datos y resultados de la prueba en el formato correspondiente
3A	Ejecutar nuevamente la misma prueba, pero aumentando el torque apriete en un 20% del valor del rango disponible entre la fuerza mínima y máxima de compresión, determinadas en el cálculo de torque
4A	Realizar el procedimiento con incrementos porcentuales de 20% hasta alcanzar el 80% de la fuerza máxima de compresión. No se recomienda llegar hasta el 100% para tener un factor de seguridad respecto a la falla de algún material
5A	Realizar una gráfica de los valores de torque aplicado y flujo de goteo obtenido

PRUEBA DE GOTEO									
Fecha:							Hora Inicio:		
BRIDA									
Tipo:				Class:				NPS:	
SELLO									
Material:				Referencia:				Peso Inicial [gr]:	
Diametro Exterior [in]:					Diametro Interior [in]:				
Espesor [in]							Promedio:		
1		2		3		4			
TORQUE									
Max [Lb-Ft]:				Min [Lb-Ft]:				Aplicado [Lb-Ft]:	
Etapas:	30%		60%		100%				
FLUIDO DE PRUEBA									
Nombre:				Referencia:				Densidad [gr/ml]	
PRESION									
Presión [psi]							Presion Inicial [psi]:		
30 min		60 min		90 min		120 min			
FIN DE LA PRUEBA									
Hora Final:				Sello:				Peso Final [gr]:	
Diametro Exterior [in]:					Diametro Interior [in]:				
Espesor [in]							Promedio:		
1		2		3		4			
Fluido Recogido [ml]:									
RESULTADOS									
Tiempo prueba [min]				Peso adicional del Sello [gr] <i>[Peso Final - Peso Inicial]</i>					
Volumen del Fluido Filtrado [ml] <i>[Peso adicional sello/ ρ fluido]</i>					Volumen total del goteo [ml] <i>[Volumen fluido filtrado + Fluido recogido]</i>				
Flujo de goteo [ml/min] <i>[Volumen total goteo/t prueba]</i>									
*Si el peso adicional es menor a 0.00 [gr] tomar el valor de 0.009 [gr]									

<b>PRUEBA HIDROSTÁTICA DE COMPROBACIÓN</b>	
1	Realizar el montaje del sello a evaluar en la brida correspondiente, teniendo en cuenta dimensiones, clase y tipo, según el procedimiento existente
2	Se recomienda comenzar la prueba entre las 4 y 6 de la tarde.
3	Definir la presión de trabajo del sello a evaluar. Ver tabla de presión por class.
4	Conectar el sistema de adquisición de datos e iniciarlo
5	Presurizar el sistema hasta una presión de al menos 1.3 veces la presión de trabajo. Se recomienda entre 1.4 y 1.5.
6	Cerrar la válvula de entrada de presión, y las válvulas que aíslan otras bridas, si se están probando más de un sello a la vez. Es importante seguir el orden, desde la entrada de presión hacia el otro sentido.
7	Después de al menos 30 minutos despresurizar la bomba
8	La duración de la prueba es de 24 horas
9	La prueba debe ser interrumpida en caso de que se detecten fugas o falla del sello.
10	Si la presión del sistema desciende por debajo del 70% de la presión de prueba, se puede dar por descartada la prueba
11	Una vez cumplidas las 24 horas, despresurizar el sistema por medio de la válvula de entrada de presión.
12	Realizar una inspección visual del exterior del sello y retirarlo de las bridas, preferiblemente, con las bridas en posición horizontal
13	Visualmente revisar el sello en busca de fallas y/o roturas notables a la vista
14	Imprimir o conservar en digital, los datos obtenidos para analizar los resultados posteriormente
<b>PRUEBA HIDROSTÁTICA DE CARACTERIZACIÓN</b>	
1A	Establecer la presión esperada de trabajo del sello hidráulico. Esta presión puede estimarse con ayuda del cálculo del torque de apriete
2A	Realizar el montaje del sello sobre la brida correspondiente (Class, tipo y dimensión) siguiendo los procedimientos existentes. Registrar los datos en el formato correspondiente
3A	Presurizar el sistema hasta la mitad de la presión esperada
4A	Esperar 30 minutos, revisar niveles de presión y realizar una inspección visual del montaje
5A	Realizar incrementos en pasos de 10% cada 30 minutos, realizando las debidas inspecciones y anotaciones hasta alcanzar el 100% de la presión esperada
6A	Despresurizar el sistema por medio de la válvula de entrada de presión y retirar el sello
7A	Si el ensayo concluye con éxito, se debe realizar una nueva prueba con el mismo tipo de sello bajo el procedimiento del numeral 6.2.3

PRUEBA HIDROSTÁTICA					
Fecha:		Hora Inicio:			
BRIDA					
Tipo:		Class:		NPS:	
SELLO					
Material:		Referencia:			
TORQUE					
Max [Lb-Ft]:		Min [Lb-Ft]:		Aplicado [Lb-Ft]:	
Etapas					
30%		60%		100%	
PRUEBA					
Presion Trabajo [psi]		Presion Prueba [psi]	$[1,4 * Presion\ trabajo]$		
Tiempo prueba [h]					
FINAL DE LA PRUEBA					
Fecha:		Hora Final:			
Presion Maxima [psi]		Presion Minima [psi]			
Temperatura Maxima [°C]		Temperatura Minima [°C]			

PRUEBA HIDROSTÁTICA PARA DETERMINAR LA PRESIÓN MÁXIMA					
Fecha:		Hora Inicio:			
BRIDA					
Tipo:		Class:		NPS:	
SELLO					
Material:		Referencia:			
TORQUE					
Max [Lb-Ft]:		Min [Lb-Ft]:		Aplicado [Lb-Ft]:	
Etapas					
30%		60%		100%	
PRUEBA					
Presion Esperada [psi]:					
	Hora	Presion [psi]		Presion Final	
Inicio		50 % Presión Esperada			
+ 30 min		60 % Presión Esperada			
+ 30 min		70 % Presión Esperada			
+ 30 min		80 % Presión Esperada			
+ 30 min		90 % Presión Esperada			
+ 30 min		100 % Presión Esperada			

**CARACTERIZACIÓN DEL SELLO HIDRÁULICO**

<b>Torque máximo [Lb-ft]</b>		<b>Class</b>	
<b>Torque mínimo [Lb-ft]</b>		<b>Brida</b>	
<b>Presión de trabajo [Psi]</b>		<b>NPS</b>	
<b>Materia / Referencial</b>			
<b>PRUEBA DE GOTEO</b>			
<b>Fluido de prueba</b>			
<b>Torque aplicado [Lb-ft]</b>			
<b>Duración de la prueba [min]</b>			
<b>Flujo de goteo [mL/s]</b>			
<b>PRUEBA HIDROSTÁTICA</b>			
<b>Torque aplicado [Lb-ft]</b>			
<b>Presión de prueba (<math>P_t * 1.5</math>) [Psi]</b>			
<b>Presión Máxima [Psi]</b>			
<b>Presión Mínima [Psi]</b>	>	<b><math>P_{prueba} / 1.3</math> [Psi]</b>	
<b>Temperatura máxima</b>	[°C]		[°F]
<b>Temperatura mínima</b>	[°C]		[°F]

Si la condición  $P_{mínima} > P_{prueba}/1.3$  se cumple, el sello hidráulico es efectivo en la presión de trabajo especificada.

Para definir la Class del sello hidráulico, buscar en la tabla de presión por Class. Seleccionar la class con la presión mas cercana por debajo a la presión de trabajo especificada.

Si el aumento de masa medido fue menor a 0.00 [g], el flujo de goteo calculado, representa el máximo que se puede presentar para el fluido de prueba utilizado.

Se recomienda realizar al menos 2 pruebas con resultados de caracterización iguales para asegurar la caracterización del sello

## ANEXO L

### CÓDIGO FUENTE TARJETA ARDUINO

```
byte rec;
int presion;
int Temp_prom,Temp_a,Temp_b,Temp_c,Temp_d,Temp_lm;
volatile int puesta_cero=0;

void setup()
{
  pinMode(3,INPUT);
  analogReference(DEFAULT); //5
  attachInterrupt(1,calibracion,RISING); //Pin 3
  Serial.begin(9600);
}

void calibracion()
{
  analogReference(DEFAULT);
  cero=analogRead(5);
  puesta_cero=1;
}

void loop()
{
  if (Serial.available()>0)
  {
    rec=Serial.read();
    delay(20);

    switch (rec)
    {
      case leer_datos:
        presion=(analogRead(5)*10)-(cero*10);

        Serial.println(presion);

        while(Serial.read() != leer_datos)
        {}
    }
  }
}
```

```

Temp_a=(-0.0041*(square(analogRead(0))))-(1.7581*analogRead(1))+311.23;
Temp_b=(-0.001*(square(analogRead(1))))-(2.5517*analogRead(1))+362.09;
Temp_c=(-0.0041*(square(analogRead(2))))-(1.7581*analogRead(2))+311.23;
Temp_d=(-0.0132*(square(analogRead(3))))+(0.4846*analogRead(3))+188.17;
Temp_lm=map(analogRead(4),0,1023,0,500);

Temp_prom=(Temp_a + Temp_b + Temp_d+Temp_lm)/4;

Serial.println(Temp_prom);
delay(20);
break;

case comprobar_conexión:
Serial.println(9);
break;

case presion_referencia:
Serial.println(puesta_cero);
break;

case set_presion_referencia:
puesta_cero=0;
break;
}
}
}

```

## ANEXO M

### CÓDIGO FUENTE VISUAL STUDIO.NET

#### ➤ Formulario de Inicio

```
Public Class Portada
    Private Sub btn_entrar_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
        btn_entrar.Click

        Me.Hide()
        Datos_prueba.Show()

    End Sub
End Class
```

#### ➤ Formulario de Configuración de prueba

```
Public Class Datos_prueba

    Dim tablas As New tablas
    Dim tabla_tip_sello As New DataTable
    Dim tabla_temp As New DataTable
    Dim calculo_btn As Boolean = False

    Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load

        tabla_tip_sello.Columns.Add("Codigo", GetType(Integer))
        tabla_tip_sello.Columns.Add("Sello", GetType(String))
        tabla_tip_sello.Columns.Add("Tabla", GetType(String))
        cmb_tipo_brida.DropDownStyle = ComboBoxStyle.DropDownList
        cmb_clase.DropDownStyle = ComboBoxStyle.DropDownList
        cmb_nps.DropDownStyle = ComboBoxStyle.DropDownList
        cmb_tipo_sello.DropDownStyle = ComboBoxStyle.DropDownList
        cmb_temp_C.DropDownStyle = ComboBoxStyle.DropDownList
        cmb_temp_F.DropDownStyle = ComboBoxStyle.DropDownList
        cmb_tipo_brida.DataSource = tablas.tipos_brida
        cmb_tipo_brida.DisplayMember = "Brida"
        cmb_tipo_brida.ValueMember = "Codigo"
        cmb_clase.Enabled = False
        cmb_nps.Enabled = False
        cmb_temp_C.Enabled = False
        cmb_temp_F.Enabled = False
        cmb_tipo_sello.Enabled = False
        txt_torque_1.Enabled = False
        txt_torque_2.Enabled = False
        txt_torque_3.Enabled = False
        txt_torque_4.Enabled = False
        txt_presion_prueba.Enabled = False
        txt_duracion.Text = 24

    End Sub

    Private Sub cmb_tipo_brida_SelectedIndexChanged(sender As Object, e As
        EventArgs) Handles cmb_tipo_brida.SelectedIndexChanged

        If Val(cmb_tipo_brida.SelectedValue.ToString) = 0 Then
            cmb_clase.Enabled = False
        End If
    End Sub
End Class
```

```

Else
    cmb_clase.Enabled = True
End If
cmb_clase.DataSource = tablas.clases_bridas
cmb_clase.DisplayMember = "Class"
cmb_clase.ValueMember = "Codigo"
End Sub

Private Sub cmb_clase_SelectedIndexChanged(sender As Object, e As EventArgs)
Handles cmb_clase.SelectedIndexChanged
    If Val(cmb_clase.SelectedValue.ToString) = 0 Then
        cmb_nps.Enabled = False
    Else
        cmb_nps.Enabled = True
    End If
    cmb_nps.DataSource = tablas.diametros
    cmb_nps.DisplayMember = "NPS"
    cmb_nps.ValueMember = "Codigo"

End Sub

Private Sub cmb_nps_SelectedIndexChanged(sender As Object, e As EventArgs)
Handles cmb_nps.SelectedIndexChanged

    If Val(cmb_nps.SelectedValue.ToString) = 0 Then
        cmb_temp_C.Enabled = False
        cmb_temp_F.Enabled = False
    Else
        cmb_temp_C.Enabled = True
        cmb_temp_F.Enabled = True
    End If
    tabla_temp = tablas.temperaturas
    cmb_temp_F.DataSource = tabla_temp
    cmb_temp_F.DisplayMember = "Fahrenheit"
    cmb_temp_F.ValueMember = "Temperatura"
    cmb_temp_C.DataSource = tabla_temp
    cmb_temp_C.DisplayMember = "Celcius"
    cmb_temp_C.ValueMember = "Temperatura"

End Sub

Private Sub cmb_temp_F_SelectedIndexChanged(sender As Object, e As EventArgs)
Handles cmb_temp_F.SelectedIndexChanged
    tabla_tip_sello.Clear()
    If Val(cmb_temp_F.SelectedValue.ToString) = 0 Then
        cmb_tipo_sello.Enabled = False
    Else
        cmb_tipo_sello.Enabled = True
        tabla_tip_sello.Rows.Add(0, "...", Nothing)
        Dim num_cod As Integer = 1

        For i = 0 To tablas.torque_recom_PTFE_virgen.Columns.Count - 1

```

```

        If tablas.torque_recom_PTFE_virgen.Columns(i).ColumnName.ToString =
cmb_clase.Text Then
            tabla_tip_sello.Rows.Add(num_cod,
tablas.nombre_sello.Rows(0).Item(1), tablas.nombre_sello.Rows(0).Item(2))
            num_cod = num_cod + 1
        End If
    Next
    For i = 0 To tablas.torque_recom_PT.Columns.Count - 1 'PT
        If tablas.torque_recom_PT.Columns(i).ColumnName.ToString =
cmb_clase.Text Then
            tabla_tip_sello.Rows.Add(num_cod,
tablas.nombre_sello.Rows(1).Item(1), tablas.nombre_sello.Rows(1).Item(2))
            num_cod = num_cod + 1
        End If
    Next
    cmb_tipo_sello.DataSource = tabla_tip_sello
    cmb_tipo_sello.DisplayMember = "Sello"
    cmb_tipo_sello.ValueMember = "Codigo"
End If
End Sub

Private Sub Button1_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_calc_datos.Click

    If cmb_tipo_brida.SelectedValue = Nothing Or cmb_clase.SelectedValue =
Nothing Or cmb_nps.SelectedValue = Nothing Or cmb_temp_F.SelectedValue = Nothing Or
cmb_tipo_sello.SelectedValue = Nothing Then
        MsgBox("Por favor completa todos los datos", MsgBoxStyle.Exclamation +
MsgBoxStyle.OkOnly, "Datos Insuficientes")

    Else
        Dim presion_trab() As DataRow
        Dim torque_max() As DataRow

        presion_trab = tablas.presion_temp_2_1.Select("Temperatura=" &
cmb_temp_F.SelectedValue & "")

        Select Case Val(cmb_tipo_sello.SelectedValue.ToString)
            Case 1
                torque_max = tablas.torque_recom_PTFE_virgen.Select("NPS=" &
cmb_nps.Text & "")
                txt_torque_prueba.Text = torque_max(0)(cmb_clase.Text)
            Case Else
        End Select
        txt_presion_trab.Text = presion_trab(0)(cmb_clase.Text)
        calculo_btn = True

    End If
End Sub

Private Sub Button2_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_calc_prueba.Click

    If IsNumeric(txt_presion_trab.Text) = False Or
IsNumeric(txt_torque_prueba.Text) = False Then

```

```

        MsgBox("Por favor ingresa los datos de Presion de Trabajo y Torque
Máximo" & vbNewLine & "0 puedes calcularlos en la parte superior",
MsgBoxStyle.Exclamation + MsgBoxStyle.OkOnly, "Datos Insuficientes")
    Else

        txt_presion_prueba.Text = Math.Ceiling((txt_presion_trab.Text) *
1.4).ToString
        txt_torque_1.Text = Math.Ceiling((txt_torque_prueba.Text) * 0.2 *
0.75).ToString
        txt_torque_2.Text = Math.Ceiling((txt_torque_prueba.Text) * 0.3 *
0.75).ToString
        txt_torque_3.Text = Math.Ceiling((txt_torque_prueba.Text) * 0.6 *
0.75).ToString
        txt_torque_4.Text = Math.Ceiling((txt_torque_prueba.Text) *
0.75).ToString

        End If
    End Sub

Private Sub Button1_Click_1(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Button1.Click

    torque_test = txt_torque_4.Text
    presion_test = txt_presion_prueba.Text
    If txt_referencia.Text = Nothing Then
        MsgBox("Introduce una referencia para el sello a probar",
MsgBoxStyle.Exclamation + MsgBoxStyle.OkOnly, "Referencia Prueba")
    Else
        If IsNumeric(txt_duracion.Text) = False Then
            MsgBox("La duración de la prueba debe ser un numero entero",
MsgBoxStyle.Exclamation + MsgBoxStyle.OkOnly, "Duración Prueba")
        Else
            If calculo_btn = True Then
                If cmb_tipo_brida.SelectedValue = Nothing Then
                    brida_test = "... "
                Else
                    brida_test = cmb_tipo_brida.Text
                End If
                If cmb_nps.SelectedValue = Nothing Then
                    nps_test = "... "
                Else
                    nps_test = cmb_nps.Text
                End If
                If cmb_clase.SelectedValue = Nothing Then
                    clase_test = "... "
                Else
                    clase_test = cmb_clase.Text
                End If
            Else
                clase_test = "... "
                brida_test = "... "
                nps_test = "... "
            End If

            referencia_test = txt_referencia.Text.ToString

```

```

        duracion_test = CInt(Math.Ceiling(Val(txt_duracion.Text)))
        Me.Hide()
        Control.Show()
    End If
End If
End Sub

Private Sub btn_calculo_manual_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_calculo_manual.Click
    Me.Hide()
    torque_manual.Show()
End Sub
End Class

```

### ➤ Formulario de Prueba hidrostática

```

Public Class Control
    Dim tiempo_transcurrido As Integer
    Dim fila As Integer
    Dim func As New Funciones
    Dim tabla_datos As New DataTable
    Dim ubicacion_formato As String
    Dim prueba_hecha As Boolean = False
    Dim time_over As Boolean = False
    Dim salir As Boolean = True
    Dim puesta_cero As Boolean = False

    Private Sub Control_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load
        btn_conectar.Enabled = True
        btn_desconectar.Enabled = False
        btn_start.Enabled = False
        btn_stop.Enabled = False
        btn_exp_datos.Enabled = False
        btn_ubicacion.Enabled = False
        txt_tiempo_mili.Enabled = False
        txt_transcurrido.Enabled = False
        txt_ruta_formato.Enabled = False
        lbl_time_over.Visible = False
        cmb_puerto.DropDownStyle = ComboBoxStyle.DropDownList
        cmb_baudrate.DropDownStyle = ComboBoxStyle.DropDownList
        cmb_puerto.Items.Add("Com0")
        cmb_puerto.Items.Add("Com1")
        cmb_puerto.Items.Add("Com2")
        cmb_puerto.Items.Add("Com3")
        cmb_puerto.Items.Add("Com4")
        cmb_puerto.Items.Add("Com5")
        cmb_puerto.Items.Add("Com6")
        cmb_puerto.Items.Add("Com7")
        cmb_puerto.Items.Add("Com8")
        cmb_puerto.Items.Add("Com9")
        cmb_puerto.Items.Add("Com10")
        cmb_puerto.Items.Add("Com11")
        cmb_puerto.Items.Add("Com12")
        cmb_puerto.Items.Add("Com13")
    End Sub
End Class

```

```

cmb_puerto.Items.Add("Com14")
cmb_puerto.Items.Add("Com15")
cmb_baudrate.Items.Add("300")
cmb_baudrate.Items.Add("600")
cmb_baudrate.Items.Add("1200")
cmb_baudrate.Items.Add("2400")
cmb_baudrate.Items.Add("4800")
cmb_baudrate.Items.Add("9600")
cmb_baudrate.Items.Add("14400")
cmb_baudrate.Items.Add("19200")
cmb_baudrate.Items.Add("28800")
cmb_baudrate.Items.Add("38400")
cmb_baudrate.Items.Add("57600")
cmb_baudrate.Items.Add("115200")
Chart1.Series("Presion").Color = Color.Blue
Chart1.Series("Temp").Color = Color.OrangeRed
Chart1.ChartAreas(0).AxisX.Enabled =
DataVisualization.Charting.AxisEnabled.False
Chart1.ChartAreas(0).AxisY2.MajorGrid.LineDashStyle =
DataVisualization.Charting.ChartDashStyle.NotSet
Chart1.ChartAreas(0).AxisY2.Maximum = 40
Chart1.ChartAreas(0).AxisY2.Minimum = 15
tabla_datos.Columns.Add("Tiempo")
tabla_datos.Columns.Add("Presion")
tabla_datos.Columns.Add("Temperatura")
Dim lb_presion As String = "" & presion_test & " Psi"
Dim lb_torque As String = "" & torque_test & " Lbf-Ft"
Dim lb_brida As String = "" & brida_test & " " & clase_test & " " &
nps_test & ""
Dim lb_referencia As String = referencia_test
Dim lb_duracion As String = "" & duracion_test & " Horas"
lbl_brida.Text = lb_brida
lbl_presion.Text = lb_presion
lbl_torque.Text = lb_torque
lbl_ref.Text = lb_referencia
lbl_duracion.Text = lb_duracion
End Sub

Private Sub btn_conectar_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_conectar.Click
Try
If cmb_puerto.Text = "" Then
MsgBox("Seleccionar el puerto de Comunicación", MsgBoxStyle.Exclamation
+ MsgBoxStyle.OkOnly, "PUERTO COM")
Else
If cmb_baudrate.Text = "" Then
MsgBox("Seleccionar tasa de transmision de datos",
MsgBoxStyle.Exclamation + MsgBoxStyle.OkOnly, "BAUDRATE")
Else
serialport_1.PortName = cmb_puerto.Text
serialport_1.Close()
serialport_1.BaudRate = cmb_baudrate.Text
serialport_1.DataBits = 8
serialport_1.Parity = Parity.None
serialport_1.StopBits = StopBits.One

```

```

        serialport_1.Handshake = Handshake.None
        serialport_1.Encoding = System.Text.Encoding.Default
        serialport_1.Open()
        serialport_1.Write("comprobar_conexion")
        Dim check_cnx As Integer = serialport_1.ReadLine
        serialport_1.Close()
        If check_cnx = 9 Then
            MsgBox("Conexión Exitosa", MsgBoxStyle.Information +
MsgBoxStyle.OkOnly, "ESTADO CONEXIÓN")
        Else
            MsgBox("Comunicación con Arduino incorrecta" & vbNewLine &
"Revisar conexiones y programa en Arduino", MsgBoxStyle.Critical +
MsgBoxStyle.OkOnly, "ESTADO CONEXIÓN")
        End If
        btn_conectar.Enabled = False
        btn_desconectar.Enabled = True
        btn_start.Enabled = True
        btn_stop.Enabled = False
        btn_exp_datos.Enabled = False
        btn_ubicacion.Enabled = False
        txt_tiempo_mili.Enabled = True
        txt_transcurrido.Enabled = False
        txt_ruta_formato.Enabled = False
    End If
End If
Catch ex As Exception
    MsgBox("Revise el puerto de conexión y/o BaudRate de la tarjeta
Arduino", MsgBoxStyle.Critical + MsgBoxStyle.OkOnly, "ERROR DE CONEXIÓN")
End Try
End Sub

Private Sub btn_desconectar_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_desconectar.Click
    If serialport_1.IsOpen = True Then
        serialport_1.Close()
    End If
    btn_conectar.Enabled = True
    btn_desconectar.Enabled = False
    btn_start.Enabled = False
    btn_stop.Enabled = False
    btn_exp_datos.Enabled = False
    btn_ubicacion.Enabled = False
    txt_tiempo_mili.Enabled = False
    txt_transcurrido.Enabled = False
    txt_ruta_formato.Enabled = False
End Sub

Private Sub Timer1_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles Timer1.Tick
    serialport_1.Open()
    serialport_1.Write("leer_datos")
    tiempo_transcurrido = tiempo_transcurrido + Timer1.Interval
    Dim valor_1
    Dim valor_2
    valor_1 = Val(serialport_1.ReadLine)
    serialport_1.Write("leer_datos")

```

```

        valor_2 = Val(serialport_1.ReadLine)
        tabla_datos.Rows.Add(tiempo_transcurrido, valor_1, valor_2)
        serialport_1.Close()
        Chart1.Series("Presion").Points.AddXY(CDb1(tabla_datos.Rows(filas).Item(0) /
3600), CDb1(tabla_datos.Rows(filas).Item(1)))

        Chart1.Series("Temp").Points.AddXY(CDb1(tabla_datos.Rows(filas).Item(0) /
3600), CDb1(tabla_datos.Rows(filas).Item(2)))
        If time_over = False Then
            If (duracion_test * 3600 = (tabla_datos.Rows(filas).Item(0) / 1000)) Then
                lbl_time_over.Visible = True
                time_over = True
            End If
        End If
        filas = filas + 1
        txt_transcurrido.Text = func.conv_seg_hora(tiempo_transcurrido)
    End Sub

    Private Sub btn_start_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_start.Click
        Dim comenzar As Boolean
        If prueba_hecha = False Then
            comenzar = True
            If puesta_cero = False Then
                serialport_1.Open()
                serialport_1.Write("presion_referencia")
                Dim chck_puesta_cero As Integer = serialport_1.ReadLine
                serialport_1.Close()
                If chck_puesta_cero = 1 Then
                    puesta_cero = True
                Else
                    MsgBox("Fije la presión en nivel 0 de referencia" & vbNewLine &
"Oprima el botón maracado 'Puesta a Cero'", MsgBoxStyle.Exclamation +
MsgBoxStyle.OkOnly, "PPRESIÓN DE REFERENCIA")
                    comenzar = False
                End If
            End If
        Else
            Dim respuesta As DialogResult = MsgBox("¿Desea comenzar otra prueba?" &
vbNewLine & "Perdera los datos anteriores, si no ha guardado", MsgBoxStyle.Question
+ MsgBoxStyle.YesNo, "COMENZAR NUEVA PRUEBA")
            If respuesta = Windows.Forms.DialogResult.Yes Then
                comenzar = True
                prueba_hecha = False
                If puesta_cero = False Then
                    serialport_1.Open()
                    serialport_1.Write("set_presion_referencia") '98
                    Dim chck_puesta_cero As Integer = serialport_1.ReadLine
                    serialport_1.Close()
                    If chck_puesta_cero = 1 Then
                        puesta_cero = True
                    Else
                        MsgBox("Fije la presión en nivel 0 de referencia" &
vbNewLine & "Oprima el botón maracado 'Puesta a Cero'", MsgBoxStyle.Exclamation +
MsgBoxStyle.OkOnly, "PRESIÓN DE REFERENCIA")
                    End If
                End If
            End If
        End If
    End Sub

```

```

        comenzar = False
    End If
End If
Else
    comenzar = False
End If
End If
If comenzar = True Then
    If IsNumeric(txt_tiempo_mili.Text) Then
        If txt_tiempo_mili.Text < 100 Then
            MsgBox("El menor intervalo admitido es 100 ms",
MsgBoxStyle.Information + MsgBoxStyle.OkOnly, "INTERVALO MINIMO")
            txt_tiempo_mili.Text = 100
        End If
        If txt_tiempo_mili.Text > 120000 Then
            MsgBox("El máximo intervalo admitido es 120000 ms",
MsgBoxStyle.Information + MsgBoxStyle.OkOnly, "INTERVALO MAXIMO")
            txt_tiempo_mili.Text = 120000
        End If
        Timer1.Interval = txt_tiempo_mili.Text
        Timer1.Start()
        tiempo_transcurrido = 0
        fila = 0
        tabla_datos.Clear()
        Chart1.Series("Presion").Points.Clear()
        Chart1.Series("Temp").Points.Clear()
        btn_conectar.Enabled = False
        btn_desconectar.Enabled = False
        btn_start.Enabled = False
        btn_stop.Enabled = True
        btn_exp_datos.Enabled = False
        btn_ubicacion.Enabled = False
        txt_tiempo_mili.Enabled = False
        txt_transcurrido.Enabled = False
        txt_ruta_formato.Enabled = False
        btn_salir.Enabled = False
        btn_volver.Enabled = False
    Else
        MsgBox("Digita un intervalo de adquisición de datos" & vbNewLine &
"El valor en milisegundos", MsgBoxStyle.Exclamation + MsgBoxStyle.OkOnly, "INTERVALO
DATOS")
    End If
Else
End If
End Sub

Private Sub btn_stop_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_stop.Click
    Dim respuesta As DialogResult = MsgBox("¿Desea terminar la prueba?" &
vbNewLine & "Dejará de recibir y guardar datos", MsgBoxStyle.Question +
MsgBoxStyle.YesNo, "TERMINAR PRUEBA")
    If respuesta = Windows.Forms.DialogResult.Yes Then

        Timer1.Stop()
    End If
End Sub

```

```

        btn_conectar.Enabled = False
        btn_desconectar.Enabled = True
        btn_start.Enabled = True
        btn_stop.Enabled = False
        btn_exp_datos.Enabled = False
        btn_ubicacion.Enabled = True
        txt_tiempo_mili.Enabled = True
        txt_transcurrido.Enabled = False
        txt_ruta_formato.Enabled = False
        btn_salir.Enabled = True
        btn_volver.Enabled = True
        prueba_hecha = True
        lbl_time_over.Visible = False
        time_over = False
        serialport_1.Open()
        serialport_1.Write("c")
        serialport_1.Close()
        puesta_cero = False

    Else
    End If
End Sub

```

```

Private Sub btn_exp_datos_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_exp_datos.Click
    Me.Hide()
    Exportando.Show()
    func.ExportToExcel(tabla_datos, func.copiar_formato(ubicacion_formato,
referencia_test), "hoja1")
    Exportando.Close()
    Me.Show()
End Sub

```

```

Private Sub btn_ubicacion_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_ubicacion.Click
    dlg_open_formato.FileName = ""
    dlg_open_formato.Title = "UBICACIÓN DEL FORMATO"
    If dlg_open_formato.ShowDialog = Windows.Forms.DialogResult.OK Then
        ubicacion_formato = dlg_open_formato.FileName
        txt_ruta_formato.Text = ubicacion_formato
        btn_conectar.Enabled = False
        btn_desconectar.Enabled = True
        btn_start.Enabled = True
        btn_stop.Enabled = False
        btn_exp_datos.Enabled = True
        btn_ubicacion.Enabled = True
        txt_tiempo_mili.Enabled = True
        txt_transcurrido.Enabled = False
        txt_ruta_formato.Enabled = False
    End If
End Sub

```

```

    Private Sub Button1_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_volver.Click
        Dim respuesta As DialogResult = MsgBox("¿Desea salir?" & vbNewLine &
"Perderá todos los datos, si no ha guardado", MsgBoxStyle.Question +
MsgBoxStyle.YesNo, "VOLVER")
        If respuesta = Windows.Forms.DialogResult.Yes Then
            salir = False
            Me.Close()
            Datos_prueba.Show()
        Else
            End If
    End Sub

    Private Sub btn_salir_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_salir.Click
        Dim respuesta As DialogResult = MsgBox("¿Desea salir?" & vbNewLine &
"Perderá todos los datos, si no ha guardado", MsgBoxStyle.Question +
MsgBoxStyle.YesNo, "SALIR")
        If respuesta = Windows.Forms.DialogResult.Yes Then
            salir = False
            End
        Else
            End If
    End Sub

    Private Sub Control_FormClosing(sender As Object, e As FormClosingEventArgs)
Handles Me.FormClosing
        If salir = True Then
            Dim respuesta As DialogResult = MsgBox("¿Desea salir?" & vbNewLine &
"Perderá todos los datos, si no ha guardado", MsgBoxStyle.Question +
MsgBoxStyle.YesNo, "SALIR")
            If respuesta = Windows.Forms.DialogResult.Yes Then
                End
            Else
                e.Cancel = True
            End If
        Else
            End
        End If
    End Sub
End Class

```

### ➤ **Formulario de cálculo de torque manual**

```

Public Class torque_manual

    Private Sub Button1_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
Button1.Click
        Me.Close()
        Datos_prueba.Show()
    End Sub

```

```

    Private Sub torque_manual_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles
MyBase.Load
        txt_torque_max.Enabled = False
        txt_torque_min.Enabled = False
    End Sub

    Private Sub btn_calc_torq_man_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_calc_torq_man.Click

        txt_torque_max.text=funciones.calc_torque_max(txt_d_pernos.Text, txt_de.Text,
txt_di.Text, txt_factor_k.Text, txt_factor_m.Text, txt_factor_y.Text,
txt_num_pernos.Text, txt_p_trabajo.Text, txt_p_trabajo.Text, txt_sy_perno.Text,
txt_sy_sello.Text)
        txt_torque_min.text=funciones.calc_torque_min(txt_d_pernos.Text, txt_de.Text,
txt_di.Text, txt_factor_k.Text, txt_factor_m.Text, txt_factor_y.Text,
txt_num_pernos.Text, txt_p_trabajo.Text, txt_p_trabajo.Text, txt_sy_perno.Text,
txt_sy_sello.Text)
    End Sub
End Class

```

\* Se ha omitido el código del módulo con datos e información interna de la empresa por solicitud de la misma