



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
**Universidad del Perú. Decana de América**  
**Facultad de Ciencias Físicas**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos**

**Análisis del sistema de despacho de gasohol con mezcla  
en línea, bajo el concepto de transferencia de custodia**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

**AUTOR**

Jorge Alberto SWAYNE MEDINA

**ASESOR**

Dr. César Alejandro QUISPE GONZÁLES

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Swayne, J. (2022). *Análisis del sistema de despacho de gasohol con mezcla en línea, bajo el concepto de transferencia de custodia*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

## Metadatos complementarios

<b>Datos de autor</b>	
Nombres y apellidos	Jorge Alberto Swayne Medina
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	40357426
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0002-6265-2747">https://orcid.org/0000-0002-6265-2747</a>
<b>Datos de asesor</b>	
Nombres y apellidos	César Alejandro Quispe Gonzáles
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10394420
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0003-3906-7221">https://orcid.org/0000-0003-3906-7221</a>
<b>Datos del jurado</b>	
<b>Presidente del jurado</b>	
Nombres y apellidos	Miguel Ángel Ormeño Valeriano
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06532600
<b>Miembro del jurado 1</b>	
Nombres y apellidos	Henry Manuel Pala Reyes
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	15860791
<b>Miembro del jurado 2</b>	
Nombres y apellidos	Gustavo Ordoñez Cárdenas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08587025
<b>Datos de investigación</b>	
Línea de investigación	No aplica.
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.

<p>Ubicación geográfica de la investigación</p>	<p>Lugar: Universidad Nacional Mayor de San Marcos  Av. Venezuela s/n cuadra 34. Lima 1-Perú  Ciudad Universitaria. UNMSM.</p> <p>Con coordenadas 12°03'30"S 77°05'00"O.  Coordenadas geográficas:  -12.056058341833014, -77.08423332678487</p>
<p>Año o rango de años en que se realizó la investigación</p>	<p>Diciembre 2019 - diciembre 2020</p>
<p>URL de disciplinas OCDE</p>	<p>Ingeniería del Petróleo, (combustibles, aceites), Energía, Combustibles  <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.03">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.03</a></p>



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
(Universidad del PERÚ, Decana de América)

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS**

*ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS EN LA MODALIDAD VIRTUAL PARA  
OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS*

*Siendo las 19:00 horas del viernes 13 de mayo de 2022, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la Presidencia del Dr. Ing. MIGUEL ANGEL ORMEÑO VALERIANO (Presidente), Mg. Ing. HENRY MANUEL PALA REYES (Miembro), Mg. Ing. GUSTAVO ORDOÑEZ CÁRDENAS (Miembro) y el Dr. Ing. CÉSAR ALEJANDRO QUISPE GONZÁLES (Asesor), se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación de Tesis para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la Modalidad de Titulación M-1 - Por Sustentación y aprobación de Tesis Profesional, del Bachiller:*

*JORGE ALBERTO SWAYNE MEDINA*

*El Presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la Tesis, así como del Resumen del Expediente e invitó al citado Bachiller a realizar la presentación y exposición de su Tesis titulada:*

*“ANÁLISIS DEL SISTEMA DE DESPACHO DE GASOHOL CON MEZCLA EN LÍNEA, BAJO EL CONCEPTO DE TRANSFERENCIA DE CUSTODIA”.*

*Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del Jurado con el apoyo de la Unidad de Informática, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión Virtual, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.*

*Al término de la deliberación el Presidente de Jurado invitó al candidato y al público en general a pasar a la Sala de Sesión Virtual, para dar lectura al Acta de Calificación, en cuyo contenido se ha registrado la nota obtenida por el bachiller, la misma que ha sido de:*

17

DIECISIETE

.....  
(NÚMERO)

.....  
(LETRAS)

*Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis, el Presidente del Jurado remitirá el Acta al Vicedecano Académico de la Facultad de Ciencias Físicas, quien la suscribirá dando fe de la realización del acto virtual de manera remota.*

*El Acta de Calificación será remitida al Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, quien a su vez solicitará la aprobación del Consejo de Facultad para el otorgamiento del Título Profesional y su elevación al Consejo Universitario para conferir el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos al Bachiller JORGE ALBERTO SWAYNE MEDINA.*



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
(Universidad del PERÚ, Decana de América)

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS**

*Siendo las 20:20 horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose tres (03) Actas originales de la Sustentación de la Tesis.*

*Ciudad Universitaria, 13 de mayo de 2022*

DR. ING. MIGUEL ÁNGEL ORMEÑO VALERIANO  
PRESIDENTE DEL JURADO

MG. ING. HENRY MANUEL PALA REYES  
MIEMBRO DEL JURADO

MG. ING. GUSTAVO ORDOÑEZ CÁRDENAS  
MIEMBRO DEL JURADO

DR. ING. CÉSAR ALEJANDRO QUISPE GONZÁLES  
ASESOR



Firmado digitalmente por LOZANO  
BARTRA Whualkuer Enrique FAU  
20148092282 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 28.05.2022 13:55:51 -05:00

DR. WHUALKUER ENRIQUE LOZANO BARTRA  
VICEDECANO ACADÉMICO FCF

*Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:*

<https://us06web.zoom.us/j/85049634712?pwd=Q1BXT252MVhkM0E4VzMxTCsvVGF4Zz09>

ID: ID de reunión: 850 4963 4712

Código de acceso: 957414

*Grabación archivada en el siguiente enlace:*

<https://www.facebook.com/FCFUNMSM/videos/566972068263119/>

## Anexo 1

### Informe de evaluación de Originalidad

1. Facultad de Ciencias Físicas
2. Escuela/Unidad de Posgrado  
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos
3. Autoridad Académica que emite el informe de originalidad  
El Director de la EPIMF
4. Apellidos y nombres de la autoridad académica  
Sarango Julca Douglas Donal
5. Operador del programa Informático de similitudes  
Dr. Ing. Douglas Sarango Julca
6. Documento evaluado (1)  
"Análisis del sistema de despacho de Gasohol con mezcla en línea, bajo el concepto de transferencia de custodia"
7. Autor del documento (2)  
JORGE ALBERTO SWAYNE MEDINA
8. Fecha de recepción del documento 3/02/22
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes 20/02/22
10. Software utilizado
  - Turnitin (X)
  - Ithenticate
  - Otro (especificar)
11. Configuración del programa detector de similitudes
  - Excluye textos entrecomillados
  - Incluye Bibliografía
  - Excluye cadenas menores a 40 palabras
12. Porcentaje de similitudes según programa detector de similitudes<sup>3</sup>  
2%
13. Fuentes originales de las similitudes encontradas<sup>4</sup>  
Ver Anexo
14. Observaciones  
Ninguna
15. Calificación de originalidad
  - Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones (X)
  - Documento cumple criterios de originalidad, con observaciones
  - Documento no cumple criterios de originalidad
16. Fecha del Informe 20 /02 /22



**DR. ING. Douglas Sarango Julca**  
DIRECTOR ( e ) DE LA EPIMF

---

1 Tesis para grado o título de pregrado, Tesis para posgrado. Otro (especificar)

2 Apellidos y Nombres completos

3 En letras y números

4 Indicarlas en orden decreciente y su respectivo porcentaje



**DEDICATORIA**

*A Joaquín , por ser el hermoso resumen de mi historia.*

*A mis padres, por darme siempre su amor y apoyo incondicional.*

*A Lucía, por ser mi soporte, mi empuje y mi tranquilidad.*

**AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a la Escuela Mecánica de Fluidos de la Universidad Mayor de San Marcos, por el conocimiento otorgado durante mis años de estudio y por cultivarme el amor por la ciencia. Pero, sobre todo, agradezco a aquellos maestros que, con el ejemplo, mostraron su compromiso de hacer mejor a nuestro país a través de las aulas.*

## RESUMEN

La preparación del combustible para automóviles resultado de la mezcla de gasolina con etanol, conocido como gasohol, exigido desde el 2010 por decreto supremo del MINEM, se realiza en las terminales mayoristas de venta de hidrocarburos. El gasohol se prepara “en línea” durante la carga de los camiones cisterna, los cuales llevarán el producto a las estaciones de servicio de consumo minorista. Dado que el combustible es un bien de alto valor, se requiere que el vendedor y el comprador pacten condiciones mínimas en cuanto al proceso de venta, para que no existan discrepancias. Uno de los principales puntos a pactar es el sistema de medición a usarse, la selección de los equipos que lo componen, el diseño del sistema, su operación y mantenimiento, ejes fundamentales para que ambas partes de la transacción confíen en que la cantidad entregada es la correcta. En la primera parte de la investigación se describen los componentes de un sistema de despacho bajo el concepto de transferencia de custodia. Se describe también las normativas que definen el diseño de estos sistemas. En la segunda parte, se plantea un procedimiento de cálculo para determinar los caudales que definen el diseño de un sistema de mezcla en línea de gasohol, mediante el análisis de las limitantes técnicas, normativas y de seguridad que se han recopilado en la primera parte. Finalmente se plantea un ejemplo que confirma que se puede lograr eficiencia del despacho, sin trasgredir las limitaciones indicadas.

**Palabras clave:** Transferencia de Custodia; Medidor de Flujo; Despacho de Gasohol; Mezcla en línea.

**“Analysis of Gasohol loading system with in-line blending,  
under custody transfer concept.”**

ABSTRACT

Automobile fuel mixture of gasoline with ethanol, known as gasohol, required by supreme decree of the MINEM, since 2010, is carried out at the wholesale hydrocarbons terminals. Gasohol is prepared during the loading of tank trucks, which will carry this product to gas stations. Since fuel is a high-value good, it is required that the seller and the buyer have minimum conditions regarding the sale process, so that there are no discrepancies in it. The measurement system is one of the main points to be agreed. The selection of the equipment that compose it, the design of the system, its operation and maintenance, are the basis for both parties trust that the volume delivered and billed is correct. The first part of the present investigation describes the gasohol dispatch system components under the custody transfer concept. The regulations that define the design of these systems are also described. The second part propose a calculation procedure in order to determine the flow rates that define the design of a gasohol in-line blending system, by analyzing the technical, regulatory and safety limitations that have been obtained in the first part. Finally, an example is presented that confirms that loading efficiency can be achieved, without exceeding the indicated limitations.

Keywords: Custody Transfer; Flow Meter; Gasohol loading; in-line blending.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>1</b>
1.1	DEFINICIÓN DEL TEMA.....	1
1.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....	1
1.2.1	Breves antecedentes de la problemática .....	1
1.2.2	Síntomas que reflejen la situación problemática. ....	3
1.2.3	Efectos inmediatos y futuros .....	3
1.2.4	Causas probables y factores asociados .....	4
1.2.5	Actores e instituciones involucradas. ....	4
1.2.6	Soluciones que se han intentado.....	4
1.3	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
1.4	JUSTIFICACIÓN .....	6
1.5	ALCANCE .....	6
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTO TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
2.1	ECUACIONES GENERALES DE DINÁMICA DE FLUIDOS.....	8
2.1.1	Ecuación de Energía .....	8
2.1.2	Ecuación de conservación de Masa .....	8
2.1.3	Número de Reynolds. ....	8
2.1.4	Ecuación de pérdida en tuberías de Darcy-Weisbach. ....	8
2.1.5	Ecuación empírica de Colebrook para tuberías comerciales. ....	9
2.1.6	Pérdidas menores.....	9
2.2	TRANSFERENCIA DE CUSTODIA .....	10
2.3	NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES PARA SISTEMAS DE DESPACHO. ....	11
2.3.1	Normas Nacionales.....	11
2.3.2	Normativa internacional. ....	14
2.4	CARACTERÍSTICAS DE LOS HIDROCARBUROS LÍQUIDOS. ....	14
2.5	METROLOGÍA.....	15
2.5.1	Exactitud ( <i>Accuracy</i> ). ....	16
2.5.2	Precisión ( <i>Precision</i> ). ....	16
2.5.3	Repetibilidad ( <i>Repeatability</i> ) y Reproducibilidad ( <i>Reproducibility</i> ). ....	17
2.5.4	Intervalo de medición .....	18

2.5.5	Linealidad.....	19
<b>3</b>	<b>COMPONENTES DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA PARA TRANSFERENCIA DE CUSTODIA.....</b>	<b>20</b>
3.1	COMPONENTES BÁSICOS.....	20
3.2	MEDIDOR DE FLUJO.....	22
3.2.1	Medidores de Desplazamiento Positivo .....	22
3.2.2	Medidores Tipo Turbina.....	26
3.2.3	Medidores Tipo Coriolis.....	32
3.3	CONTROLADOR.....	37
3.4	VÁLVULA DE CONTROL.....	38
3.5	SENSOR DE TEMPERATURA.....	39
3.6	SISTEMAS PERIFÉRICOS.....	40
3.6.1	Monitor de Puesta a tierra.....	41
3.6.2	Monitor de Sobrellenado.....	42
3.6.3	Sistemas de inyección de aditivos.....	44
3.7	OTROS COMPONENTES.....	47
3.7.1	Filtro de malla o Colador.....	47
3.7.2	Brazo de Carga y Acople.....	47
3.8	DESPACHO DE GASOLINAS EN PLANTAS DE VENTAS DEL PERÚ.....	49
3.8.1	Configuraciones de medidores para mezcla en línea.....	50
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS Y CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESPACHO DE GASOHOL.....</b>	<b>53</b>
4.1	VELOCIDAD LÍMITE EN TUBERÍAS DE HIDROCARBUROS.....	53
4.2	CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE DESPACHO GASOHOL EN UN SISTEMA CON MEZCLA EN LÍNEA.....	54
4.3	CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE DESPACHO. ...	57
4.4	CONSIDERACIONES PARA LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE DESPACHO.....	59
<b>5</b>	<b>OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS BÁSICOS DESTINADOS AL DISEÑO DEL SISTEMA DE DESPACHO Y SU CONFIGURACIÓN.....</b>	<b>60</b>
5.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE DESPACHO DE APLICACIÓN Y REQUERIMIENTO. ....	60
5.2	PROPUESTA PARA EL NUEVO TREN DE ETANOL.....	62

5.3	DETERMINACIÓN DE LOS FLUJOS MÁXIMOS DURANTE EL LLENADO DE CISTERNA.	63
5.3.1	Escenario de máximo requerimiento de etanol.....	65
5.3.2	Escenario de máximo requerimiento de gasolina. ....	68
5.3.3	Determinación del máximo caudal de gasolina a configurarse en el controlador.....	69
5.4	CÁLCULOS PREVIOS AL ANÁLISIS HIDRÁULICO. ....	69
5.4.1	Propiedades de los productos de la mezcla. ....	69
5.4.2	Factores de fricción en tuberías .....	70
5.4.3	Pérdida de presión debido a los trenes de medición. ....	72
5.5	ANÁLISIS HIDRÁULICO.....	73
5.5.1	Presión en el punto de Mezcla. ....	73
5.5.2	Determinación de la presión de bomba requerida para la línea de gasolina... ..	76
5.5.3	Determinación de la presión de bomba requerida para la línea de etanol. ....	77
5.6	VALORES PARA CONFIGURAR EL SISTEMA DE DESPACHO.....	79
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>81</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>85</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>86</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>88</b>
	A. INFORMACIÓN DE TECHNIPFMC POR LOS COMPONENTES DEL TREN DE MEDICIÓN.....	88
	A.1. MEDIDOR MODELO PRIME4 - BULLETIN SS01096 ISSUE/REV. 1.8 (11/14).....	88
	A.2. MEDIDOR MODELO GENESIS - BULLETIN SS01060 ISSUE/REV. 1.0 (2/17) .....	89
	A.3. STRAINER IN-LINE – BULLETIN SS03039 .....	90
	A.4. VÁLVULA MODELO 210 – BULLETIN SS03009 ISSUE/REV. 1.1 (10/17).....	90
	B. CONFIGURACIONES DE TUBERÍA ANTES DE UN MEDIDOR TIPO TURBINA (MPMS 5.3 – APÉNDICE A).....	91

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1 - Coeficientes representativos de pérdidas de carga, K, para diferentes accesorios.	9
Tabla 2 – Características de Hidrocarburos Comercializados en Terminales peruanas.....	15
Tabla 3 - Confiabilidad vs Desviación estándar multiplicado por el factor de cobertura. ..	17
Tabla 4 - Valores calculados de Longitud de entrada para tubería de 4” con flujo de 650 gpm de gasolina. ....	30
Tabla 5-Velocidades Límite para tuberías de 2, 3 y 4 pulg. ....	54
Tabla 6 - Datos relevantes de los tanques existentes.....	62
Tabla 7 - Caudales máximos para despacho de 500 galones de gasohol. ....	68
Tabla 8 - Caudales máximos para despacho de 12 000 galones de gasohol. ....	69
Tabla 9 - Propiedades de los productos a usar en el cálculo. ....	70
Tabla 10 – Cálculo del Factor de Fricción para las tuberías. ....	71
Tabla 11-Cuadro de Pérdidas de Presión para los trenes de medición. ....	73



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Sistema básico de medición para transferencia de custodia. ....	20
Figura 2- Sistema automatizado básico para carga de cisternas.....	21
Figura 3 - Medidores de Desplazamiento Positivo.....	23
Figura 4 - Medidor de Desplazamiento Positivo, tipo Engranés Ovalados.....	23
Figura 5 - Medidor de Desplazamiento Positivo, tipo BiRotor Brodie.....	24
Figura 6 - Medidor de Desplazamiento Positivo, tipo Paletas Deslizantes – TechnipFMC. .....	24
Figura 7 - Deslizamiento de líquido en Medidores de Desplazamiento Positivo.....	25
Figura 8 - Medidores tipo turbina y accesorios de acondicionamiento de flujo (derecha).	27
Figura 9 - Partes básicas de un Medidor de Turbina. ....	27
Figura 10 - Tipos de Turbinas. ....	27
Figura 11 - Longitud de entrada. ....	29
Figura 12 - Acondicionador de Flujo de tubos. Elaboración propia .....	30
Figura 13 - Acondicionador de Flujo de plato agujereado. ....	31
Figura 14 - Medidores Másicos tipo Coriolis.....	32
Figura 15 - Movimiento de bala desde puntos de referencia inercial y no inercial.....	33
Figura 16 - Fuerzas sobre las tuberías internas del medidor tipo Coriolis durante rotación en sentido antihorario. ....	34
Figura 17 - Fuerzas sobre las tuberías internas del medidor tipo Coriolis durante la oscilación.....	35
Figura 18 – Deformación de tubos de medidor tipo Coriolis oscilando, sin flujo (izquierda) y con flujo (derecha).....	35
Figura 19 - Controladores de Despacho actuales. ....	38
Figura 20 - Válvula de Control Electro-Hidráulica.....	39
Figura 21 - Instalación de sensor de temperatura en tubería. ....	40
Figura 22 - Monitores de Puesta a Tierra con conector tipo Pinza.....	42
Figura 23 - Toma (en cisternas) y plug (cable del monitor) estándar para Sistemas de Sobrellenado. ....	43
Figura 24 - Funcionamiento del Sensor Óptic.....	43
Figura 25 - Partes de un inyector de aditivos con medición de volumen, tipo monobloque. .....	46
Figura 26 - Sistema de aditivación típico. ....	46

Figura 27 - Primeros brazos de "carga por el fondo" en Perú (1999), Terminal Callao - Petroperú.....	48
Figura 28 - Acople API de la marca OPW, modelo LYNX. ....	48
Figura 29 - Sistema de Medición automatizado estándar, con mezcla en línea en configuración "Ratio Blending". ....	50
Figura 30- Caudal vs Tiempo de Despacho - 1000 galones de gasohol (ideal) .....	55
Figura 31- Caudal vs Tiempo de Despacho - 1000 galones de gasohol (real simplificado).....	56
Figura 32 - Componentes del brazo de carga de Gasolina existente. ....	61
Figura 33 - Esquema general del sistema de mezcla de ejemplo. ....	62
Figura 34 - Distribución de tren de etanol respecto al tren de medición de gasolina.....	63
Figura 35 - Esquema de Caudal vs Tiempo para la gasolina.....	65
Figura 36- Esquema de Caudal vs Tiempo para el etanol. ....	66
Figura 37- Caída de presión de medidor de 4", modelo Prime; y medidor de 2, modelo Genesis.....	72
Figura 38-Cáida de Presión para filtro mesh40, modelo In-Line.....	72
Figura 39-Caída de Presión para Válvula de Control, modelo 210.....	73
Figura 40- Punto de mezcla y brazo de carga.....	74
Figura 41 - Medidas y accesorios tren de etanol. ....	78

## **1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 DEFINICIÓN DEL TEMA**

El presente trabajo está referido al análisis de la información básica de la hidráulica para el diseño de un tren de medición de un sistema de despacho gasohol con mezcla en línea, bajo el concepto de transferencia de custodia, considerando la normativa nacional e internacional, así como la información técnica publicada por fabricantes de los componentes del sistema de medición. Se considerarán principalmente los decretos supremos N°043 y N°045 del Ministerio de Energía y Minas, y el *Manual of Petroleum Measurement Standards* (MPMS) del Instituto Americano de Petróleo (API).

### **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

#### **1.2.1 Breves antecedentes de la problemática**

Desde que el hombre descubrió que podía crear y manipular el fuego ha habido un constante desarrollo en el entendimiento y uso de las energías, siendo estos avances el gran motor de cambio de nuestra sociedad. Los combustibles fósiles que inicialmente fueron usados para calentarnos y alumbrarnos, mediante el ingenio humano, hoy mueven al mundo en su sentido más literal, nos transportan por agua, cielo y tierra.

Actualmente, la distribución de los combustibles líquidos para automóviles, aviones y barcos se ha vuelto la columna vertebral del desarrollo de un país. La ausencia de estos combustibles no permitiría, por ejemplo, que las cosechas de la sierra central llegaran a los mercados de la costa, que los turistas arribaran a sus destinos, que los cargamentos de mineral llegaran al puerto de exportación; en resumen, se paralizaría la economía local.

La demanda proyectada de combustibles líquidos en el país ha generado la necesidad de ampliar las Terminales de Venta de los distribuidores mayoristas (Osinergmin, 2015). Esta demanda se puede observar en la necesidad de los Mayoristas de ejecutar proyectos de ampliación y mejoras de sus plantas existentes, como las Terminales de Petroperú de Conchán (Lima) y Talara (Piura), la Terminal de Pisco (Ica) de Pluspetrol; y los proyectos de creación de nuevas Terminales en Ilo (Moquegua) y Ninacaca (Pasco) de Petroperú, y Mollendo (Arequipa) de la corporación Montezul (información recopilada por la empresa RESERTEC S.R.L.).

Las Terminales son los puntos neurálgicos de la distribución de combustible en el País, por lo que los nuevos proyectos hacen necesario contar con profesionales que sean capaces de diseñar, operar y mantener las plantas; así como de asesorar al personal de estas en temas normativos locales e internacionales, y en la selección de los equipos y sistemas para su correcta operación.

Según experiencia de la empresa RESERTEC S.R.L., las Plantas de Ventas existentes han debido aumentar sus horas de trabajo, en los últimos años, para poder cumplir con la distribución del combustible, llegando a trabajar sin descanso hasta 22 horas diarias, 6 días a la semana.

. En Plantas de Ventas como la perteneciente a la Refinería Conchán, se pueden ver largas colas de camiones cisterna estacionados esperando su turno para ser atendidos. La necesidad de trabajar más horas para cumplir con sus clientes genera sobretiempos de personal y aumento de carga de trabajo de la maquinaria, lo que ocasiona mayores costos anuales de operación y mantenimiento. Fallas en sus equipos debido a la sobre exigencia, limita la capacidad operativa de la planta, acentuando el problema.

Los sistemas hidráulicos que transportan el combustible desde los tanques hasta las islas o puentes de despacho de camiones-cisternas, cuentan con sistemas de medición y control de flujo, que deben trabajar bajo el concepto de transferencia de custodia para la medición y cálculo del volumen entregado.

Los sistemas hidráulicos de las islas de despacho, sea para una instalación nueva o la ampliación de una planta existente, deben ser diseñados considerando los requerimientos propios del sector descritos en la normativa nacional e internacional para una operación que permita trabajar dentro de las características de confiabilidad de un sistema para transferencia de custodia. Así también se debe considerar las recomendaciones para una operación que no ponga en riesgo tanto la vida de los trabajadores y el patrimonio de la empresa. El diseño debe asegurar que el funcionamiento de los sistemas se encuentre dentro de los límites de operación para el mejor rendimiento y cuidado de los equipos de la instalación.

El diseño hidráulico, y la selección adecuada de los equipos a utilizar en el tren de medición deben considerar las variables propias de cada operación, por lo que es indispensable el análisis de las particularidades de cada caso, con el fin de asegurar el funcionamiento apropiado de los sistemas de medición de volumen bajo el concepto de transferencia de custodia.

### **1.2.2 Síntomas que reflejen la situación problemática.**

Los principales síntomas de los problemas originados por un mal diseño en la hidráulica de los sistemas de despacho de gasolinas y diésel, y de una selección inadecuada de los componentes, son:

- Fallas en los componentes del sistema de medición por sobre exigencia de estos, debido al cambio de presiones en el sistema hidráulico durante la operación.
- Disminución de la calidad de la medida del volumen, debido a caudales fuera del rango de operación del sistema de medición.
- Requerimiento de calibración de los medidores de flujo debido al desfase en la medición del volumen.
- Riesgos de incendio al no respetar las medidas de seguridad para el despacho de camiones-cisterna.
- Riesgo de derrame por sobrellenado de la cisterna, por fallas de la válvula de control del sistema o por medidores descalibrados.

### **1.2.3 Efectos inmediatos y futuros**

Los principales efectos de un mal diseño hidráulico en los sistemas de despacho, y una incorrecta selección de equipos, son:

- Aumento de la frecuencia de mantenimiento de los componentes del sistema de medición al operar dentro del rango de adecuado.
- Quejas de los clientes por no haber recibido el volumen de combustible facturado.
- Aumento de la frecuencia de verificaciones y calibraciones de los sistemas de medición de la planta, lo que aumenta los tiempos de parada de las islas, y por lo tanto disminuye la frecuencia de la atención de los clientes.
- Menor exactitud en los balances diarios de productos.
- Riesgo de incendio al inicio del despacho por carga eléctrica en la cisterna.
- Riesgo de derrames de producto, por falla de los componentes.
- Aumento de gastos en los recursos de las Plantas de ventas.

#### **1.2.4 Causas probables y factores asociados**

Las principales causas de los problemas descritos son:

- Desconocimiento de la normativa nacional e internacional, por parte de los ingenieros encargados en el diseño.
- Desconocimiento de los principios de operación de las componentes de los trenes de medición.
- No considerar en el diseño hidráulico los escenarios extremos que pueden originar problemas en el sistema de despacho.
- No determinar adecuadamente los parámetros a ingresar en el sistema de control.

#### **1.2.5 Actores e instituciones involucradas.**

Los principales involucrados en este sector son las empresas dueñas de Plantas de Ventas del país, siendo las principales en actividad:

- Petroperú S.A.
- Repsol S.A.;
- Ministerio de Energía y Minas entidades gubernamentales como el
- Osinergmin
- Inacal
- Empresas operadoras de Terminales y Plantas de Ventas;
- Empresas de ingeniería y construcción.

#### **1.2.6 Soluciones que se han intentado.**

Para solucionar los problemas mencionados en plantas existentes, los operadores y dueños de estas contratan empresas de ingeniería o se contactan con las empresas fabricantes de equipamiento a través de los distribuidores locales, para que, en sus aportes, presenten soluciones a la problemática. Estas acciones no resuelven completamente el problema porque, en la primera, no necesariamente se cuenta con personal experimentado en la operación de estos sistemas; y en la segunda, el fabricante suele inclinar las soluciones hacia los diseños propios que podrían no ser, necesariamente, la mejor solución.

Es importante mencionar que, debido a la demanda de trabajo de las plantas de ventas, y la dificultad de detener la operación, las áreas de mantenimiento de estas son las principales responsables en solucionar los problemas en las instalaciones, teniendo usualmente ventanas de tiempo muy estrechas y recursos limitados. Las soluciones planteadas por las áreas de mantenimiento suelen enfocarse a resolver problemas puntuales y no ver al sistema en su totalidad.

En las plantas nuevas existe la tendencia de contratar grandes empresas de ingeniería que se encargan de todo el diseño, incluyendo procesos, cimentaciones, estructuras, servicios, tanques, sistemas eléctricos, entre otros; sin embargo, al abarcar muchas áreas se puede perder el enfoque en los sistemas de despacho.

### **1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.**

La presente investigación tiene un enfoque metodológico Cualitativo, por lo que los objetivos son planteados desde esta perspectiva.

#### **i. Objetivo general:**

Analizar un tren de medición estándar de un sistema de despacho de gasohol con mezcla en línea, bajo el concepto de transferencia de custodia; y proponer un procedimiento para la obtención de los parámetros preliminares al diseño de dicho sistema.

#### **ii. Objetivos específicos:**

1. Explicar el concepto de transferencia de custodia aplicada a las transacciones de hidrocarburos líquidos, basados en la normativa nacional e internacional, y la literatura existente al respecto.
2. Describir y Analizar los componentes de un sistema de medición de hidrocarburos líquidos con mezcla en línea, y los conceptos más importantes relacionados.
3. Proponer un procedimiento de obtención de los parámetros básicos destinados al diseño hidráulico de un sistema eficiente de despacho de gasohol con mezcla en línea.
4. Demostrar, mediante un ejemplo aplicativo de cálculo, que es posible aplicar el procedimiento propuesto.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN**

Por lo expuesto en párrafos anteriores, tener claros los conceptos de funcionamiento, así como los requerimientos de un sistema de medición dinámica de volumen, que trabaja bajo el concepto de transferencia de custodia, permite darle la importancia debida al diseño del sistema de despacho en las Plantas de Ventas de Hidrocarburos. De este modo se asegura que el sistema diseñado mantendrá su capacidad de cumplir con el fin para el que fue creado, haciendo que las medidas de volumen obtenidas sean confiables para las partes involucradas en la transacción. Así también, se asegura una disminución de costos de mantenimiento al largo plazo, y por lo tanto un retorno eficiente de la inversión inicial.

## **1.5 ALCANCE**

La presente investigación tiene un enfoque metodológico Cualitativo, e intentará explicar los temas relacionados a la transferencia de custodia de hidrocarburos líquidos, explorando en la normativa e información técnica existente al respecto; para proponer, finalmente, un procedimiento de obtención de los parámetros básicos para el diseño final del sistema.

El capítulo 2 describirá la teoría de Dinámica de Fluidos a utilizarse en los cálculos, y los conceptos relacionados a la transferencia de custodia, como la metrología y la normativa nacional e internacional.

El capítulo 3 describirá los componentes de un sistema de medición de hidrocarburos líquidos, poniendo especial énfasis en detalles técnicos de los medidores de flujo.

El capítulo 4 analizará el proceso de despacho de gasohol con mezcla en línea, y propondrá los escenarios sobre los cuales se deberán calcular los parámetros preliminares que determinarán el diseño y configuración del sistema.

El capítulo 5 será un ejemplo práctico de lo propuesto en el capítulo 4, aplicado en una configuración simplificada hipotética de un sistema de despacho. En este se obtendrán los parámetros básicos destinados al diseño hidráulico del sistema, y su configuración. En este capítulo se utilizarán los conceptos descritos en los capítulos anteriores, a través de cálculos de ingeniería, con la finalidad de obtener los parámetros preliminares de diseño y configuración del sistema.

El presente documento no tocará temas relacionados a costos, metrados o materiales a utilizar en la fabricación de sistemas de medición, ni sus sistemas de tuberías y bombeo, así



como cálculos estructurales. Tampoco es parte del alcance la elaboración de planos constructivos o de montaje, estudios de impacto ambiental, o estudios de inversión.

## 2 FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1 Ecuaciones Generales de Dinámica de Fluidos

#### 2.1.1 Ecuación de Energía

Ecuación modificada de Bernoulli para 2 puntos de una tubería, con flujo de líquidos no compresibles.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \text{pérdidas}_{1-2}$$

Donde, para 2 puntos en una tubería se tiene:  $P_1$  y  $P_2$  = presión manométrica del fluido;  $V_1$  y  $V_2$  = velocidad del fluido;  $Z_1$  y  $Z_2$  = altura desde el punto de referencia;  $g$  = gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ );  $\text{pérdidas}_{1-2}$  = pérdida de cabeza debido a la fricción;  $\gamma$  = peso específico del fluido.

#### 2.1.2 Ecuación de conservación de Masa

Ecuación para 2 puntos de una tubería, con flujo de fluido no compresible.

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

Donde:  $Q$  = caudal volumétrico constante en la tubería;  $A_1$  y  $A_2$  = área de la tubería, perpendicular al flujo;  $V_1$  y  $V_2$  = velocidad del flujo.

#### 2.1.3 Número de Reynolds.

Ecuación para determinar si el flujo es de tipo laminar, turbulento o en fase de transición.

$$Re = \frac{v\rho D}{\mu}$$

Donde,  $Re$  = Número de Reynolds, adimensional;  $v$  = velocidad de flujo;  $\rho$  = densidad de fluido;  $D$  = diámetro transversal interior del tubo;  $\mu$  = viscosidad dinámica del fluido

#### 2.1.4 Ecuación de pérdida en tuberías de Darcy-Weisbach.

Ecuación para el cálculo de las pérdidas

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Donde:  $h_f$  = pérdida de carga en unidades de longitud;  $V$  = velocidad de flujo.

### 2.1.5 Ecuación empírica de Colebrook para tuberías comerciales.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,869 \ln \left( \frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,523}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Donde:  $\epsilon$  = rugosidad de la tubería. Para tuberías comerciales de acero: 0,046 mm.

Cuando se cumple que:

$$10^{-6} \leq \frac{\epsilon}{D} \leq 10^{-2}$$

$$5000 \leq Re \leq 10^8$$

Se puede usar la siguiente expresión explícita, con un error de 1% (Streeter, Wylie, & Bedford, 2000):

$$f = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,47}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$

### 2.1.6 Pérdidas menores

Se usará el coeficiente  $K$ , obtenido de tablas, aplicado a la ecuación:

$$h_{f(\text{menores})} = K \frac{V^2}{2g}$$

Los siguientes coeficientes son tomados de Mecánica de Fluidos - 9na edición (Streeter, Wylie, & Bedford, 2000)

Tabla 1 - Coeficientes representativos de pérdidas de carga,  $K$ , para diferentes accesorios.

Accesorio	K
Válvula de cheque (completamente abierta)	2,5
Válvula de compuerta (completamente abierta)	0,19
Tee estándar a 90°	1,8
Codo estándar	0,9
Entrada recta a tubería	0,5

Fuente: (Streeter, Wylie, & Bedford, 2000)

Para reducciones:

$$h_{f(\text{reducción})} = K_r \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

Donde  $K_r = 1,1$ ; para una reducción comercial con ángulo  $60^\circ$ .

## 2.2 Transferencia de Custodia

En la transferencia de combustibles o cualquier otro bien de alto valor, se requiere que la cantidad y calidad del producto declaradas por la entidad que entrega, sean las mismas que recibe la otra parte. Esta transacción debe ser realizada de tal forma que ambas partes estén de acuerdo con las cantidades, las características del producto, y el monto pagado por éste. Usualmente, ambas partes suelen tener una relación de vendedor-comprador; sin embargo, la transferencia de un bien no implica necesariamente una transacción monetaria. Ambas partes pueden ser áreas de una misma empresa o de entidades diferentes, entre las cuales se traslada la responsabilidad de custodia del bien, o su propiedad. Pero, en ambos casos, debido al alto valor del bien, la responsabilidad de la pérdida o robo de algún pequeño porcentaje de este siempre implica pérdida monetaria para alguno de los implicados.

En su libro *Fluid Flow Measurement*, el autor (Upp, 1993) explica que para la “Transferencia de Custodia” de fluidos “el flujo medido es igual a dólares”, de aquí la importancia de que ambas partes de la transacción sean tratadas justamente. Para esto indica una serie de puntos que deben ser pactados (mediante un contrato, por ejemplo) entre ambas partes de la transacción. Los más importantes son: la cantidad del material, el punto de entrega, propiedades del producto; diseño de estaciones de medición, su mantenimiento y operación; las unidades de medición; la calidad del producto y el proceso de pago.

Upp destaca la importancia de tener claros los conceptos de exactitud e incertidumbre de la medición, y entender que, para la transferencia de custodia, deben ser prácticamente “cero”. También reconoce la imposibilidad de lograr esta condición, debido a limitaciones técnicas. Esto quiere decir que no es posible medir sin error el volumen de una transacción; y aun así, ambas partes deben estar de acuerdo con la esta.

También recalca la importancia de los procedimientos de operación de las estaciones de medición, indicando que estas deben: 1) minimizar las variaciones de flujo obteniendo el mejor control de flujo posible; 2) realizar pruebas periódicas del sistema verificando que se encuentran dentro de los parámetros pactados a través de calibraciones con equipo para prueba

estandarizados (*provers*); 3) mantener un historial de mantenimiento y operación que permita a ambas partes auditar las transacciones realizadas.

El diseño y selección adecuada de los componentes del sistema de medición se hace particularmente importante para asegurar el correcto funcionamiento de este, teniendo especial cuidado en que el sistema cuente con lo necesario para poder cumplir con lo requerido en el párrafo anterior.

## **2.3 Normas nacionales e internacionales para sistemas de despacho.**

### **2.3.1 Normas Nacionales.**

#### **iii. LEY N° 26221 – LEY ORGÁNICA DE HIDROCARBUROS, y normativas relacionadas.**

Esta ley norma las actividades de Hidrocarburos en el territorio peruano; define el rol del estado y las entidades responsables de las políticas relacionadas. Asigna al Ministerio de Energía y Minas la elaboración, aprobación y aplicación de las políticas del Sector de Hidrocarburos, y se nombra a OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería) como el organismo fiscalizador de estas.

La ley abarca todo lo concerniente en temas técnicos y financieros sobre los contratos para exploración y explotación de Hidrocarburos en el país, designando a PERUPETRO S.A. como el encargado de promover las inversiones relacionadas.

Respecto a la refinación, importación y almacenamiento de hidrocarburos, determina que cualquier persona natural o jurídica, nacional o extranjera puede instalar operar y mantener las Refinerías y Terminales.

#### **iv. D.S. N° 045-2001-EM y modificación con D.S. N°045-2005**

Este Decreto Supremo es el “Reglamento para la comercialización de combustibles líquidos y otros productos derivado de los hidrocarburos”, el cual norma el diseño, las instalaciones y equipamiento de los Terminales, así como su operación y procedimientos de control volumétrico. También define los requisitos para calificar a los operadores de Terminales, distribuidores mayoristas y minoristas, e importadores de hidrocarburos.

Define que son parte de una Terminal: sus tanques, sistemas de recepción y carga de productos, patio de maniobras, bombas, tuberías, zona de atraque de navíos, líneas submarinas,

sistemas contra incendio y de seguridad, entre otros equipos, áreas y sistemas relacionados a su actividad.

Define que los sistemas de despacho de líquidos de Clase I y II (gasolinas, diésel, kerosene, combustible para aviación y de uso marino, combustible residual), deben ser del tipo “Carga por el Fondo” (Bottom Loading), exceptuando los que se calienten por encima de la temperatura ambiental, como puede ser el caso de los combustibles residuales de alta viscosidad. Define además que estos sistemas deben contar con tres subsistemas adicionales que deberán detener el flujo en caso se detecte:

- sobrellenado de la cisterna, con el fin de evitar derrames,
- pérdida de la puesta a tierra del chasis del camión, con la finalidad de evitar chispas que puedan iniciar un incendio,
- incendio.

El llenado de la cisterna desplaza los gases acumulados en ella, que podrían encontrarse en una mezcla con oxígeno por encima del límite de explosividad, por lo que se requiere que estos gases no se liberen al ambiente y sean canalizados a través de un sistema de recepción de vapores, hacia quemadores o procesos de recuperación.

En el Artículo 14, se mencionan las condiciones de carga y descarga de camiones, de las cuales mencionaremos las siguientes:

- Para evitar alteraciones o contaminaciones, cada producto deberá tener su propia línea de despacho.
- Se instalarán válvulas para el control del sistema de despacho de Medios de Transporte Terrestre, las cuales serán de cierre automático.
- Se instalará un sistema de cierre de emergencia en el sistema de despacho, de tal manera que éstas queden aisladas en caso de fuego. Si son válvulas manuales, se colocarán a no menos de quince (15) metros de la más próxima posición del Medio de Transporte. En caso de que sean válvulas motorizadas, éstas podrán ser cerradas mediante interruptores de emergencia ubicados en el puente de despacho o en las oficinas, o mediante detectores de fuego.

Esta normativa también exige que los Terminales calibren sus Medidores de Flujo del sistema de despacho cada 6 meses.

Para la verificación/calibración de los medidores de flujo, se determina que cada planta cuente con un Cilindro Patrón (conocido también como Patrón Volumétrico o Serafín), calibrado por el Laboratorio Nacional de Metrología o por una entidad acreditada para esto. La validez de la certificación es de 2 años, siempre que el patrón no tenga abolladuras o desgaste que pueda haber cambiado el volumen interno.

**v. D.S. 043-2007-EM**

Este Decreto Supremo es el “Reglamento de Seguridad para el Almacenamiento de Combustibles”, el cual tiene como objetivo proteger a las personas que trabajan en el sector, a terceros y a las instalaciones, así como preservar el ambiente.

Para cualquier persona o empresa que se desarrolle en el sector, la lectura de este reglamento es prioritaria, dado que norma las obligaciones relacionadas con la seguridad. Ningún trabajo dentro de una instalación de refinación, almacenamiento o venta de hidrocarburos debe empezarse sin haber cumplido las exigencias que se mencionan. Es importante que los ingenieros encargados del Diseño de las instalaciones conozcan las normativas de este reglamento.

Es importante destacar que este reglamento prevé los desarrollos tecnológicos y permite el uso de estándares, códigos o prácticas recomendadas no mencionadas, siempre que sean revisadas y aceptadas por OSINERMIN, y otorguen igual o mayor protección a las personas, equipos, instalaciones y ambiente. También se define que OSINERMIN es la entidad fiscalizadora del cumplimiento de estas normas.

El reglamento define que todas las instalaciones y componentes de sistemas eléctricos y electrónicos, dentro de plantas de hidrocarburos, deben contar con aprobaciones para el área donde trabajarán. Mencionan los siguientes documentos que deberán cumplirse: Código Nacional de Electricidad, el NEC 70, NFPA 70, API-RP-500 y API-RP-505, los cuales definen las “Áreas Clasificadas”. También obliga al adecuado aterramiento de las instalaciones y medios de transporte de hidrocarburos, para evitar chispas que puedan originar incendios, debido a la presencia de vapores inflamables. Específicamente, a los camiones tanque se les prohíbe hacer carga o descarga de productos, si los potenciales eléctricos entre este y el punto de carga o descarga, no son igualados.

#### **vi. D.S. 91-2009-EM**

Este decreta que, a partir del año 2010, la gasolina y el diésel que se comercializa para uso en automóviles, en la mayor parte del país, contengan una proporción de un producto secundario que disminuya la emisión de gases invernadero, como el CO<sub>2</sub>. En el caso de las gasolinas, esta se debe mezclar con 7.8% de alcohol carburante (etanol anhidro desnaturalizado), llamándose “Gasohol” al producto resultante. En el caso del diésel, se debe mezclar con 5% de Biodiésel (también llamado B100), que es un aceite procesado obtenido de vegetales (palma, soya, girasol), animales, o de aceites comestibles usados. Al producto resultante de la mezcla se le denomina “Diesel B5”. La normativa también indica que es posible la comercialización del Diésel B20 (80% diésel, 20% de biodiesel) a través de las “Distribuidores Mayoristas” (Terminales de Ventas o Plantas de Abastecimiento) directamente a usuarios directos, pero no se especifica un uso particular.

### **2.3.2 Normativa internacional.**

#### **vii. Normas API.**

El Instituto Estadounidense del Petróleo (API por sus siglas en inglés - American Petroleum Institute), es una asociación de compañías relacionadas a la industria del Gas y Petróleo (desde la producción hasta la venta, incluyendo a fabricantes de equipos y empresas de servicio), fundada en 1919, y tiene como misión: “...to promote safety across the industry globally and to influence public policy in support of a strong, viable U.S. oil and natural gas industry” [*... promover la seguridad en toda la industria a nivel mundial e influir en las políticas públicas en apoyo de una industria de petróleo y gas natural sólida y viable en los Estados Unidos*]. (About API, s.f.)

La asociación investiga y recopila información para desarrollar estándares enfocados en todos los aspectos de la industria de Gas y Petróleo. Estos estándares son base de las leyes y normas del sector en muchos países. En la normativa nacional se cita continuamente los estándares API para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de todos los componentes relacionados a la exploración, producción, transporte, almacenamiento y distribución de hidrocarburos.

### **2.4 Características de los hidrocarburos líquidos.**

Es importante conocer las características de los hidrocarburos despachados y almacenados en las Terminales, debido a que estas definen, por ejemplo: el material de construcción y normas de diseño de ductos y equipos, clasificación de los modelos de



instrumentación, temperatura de trabajo, entre otros. Además, estas características dan una medida de la peligrosidad de la exposición de estos productos en los seres vivos y medio ambiente, y define los cuidados que se deben tener en su manipulación.

Para este fin, se encuentra ampliamente difundido el uso de las “Hoja de Datos de Seguridad de Materiales”, por sus siglas en inglés “MSDS” (Material Safety Data Sheet); o también conocido como “Cartilla de Seguridad de Material Peligroso” (CSMP). Este documento tiene por finalidad informar al usuario los datos fisicoquímicos de los productos, su peligrosidad (reactividad, inflamabilidad, explosividad, toxicidad), y los cuidados que se deben tener para su manipulación y almacenaje.

En las páginas web de Petroperú S.A. y REPSOL S.A. se pueden descargar los MSDS de los hidrocarburos comercializados en sus terminales, emitidos por sus laboratorios.

Para la selección de los equipos de los sistemas de medición, se requiere básicamente contar con los datos de densidad y viscosidad características de los productos.

*Tabla 2 – Características de Hidrocarburos Comercializados en Terminales peruanas.*

	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Presión de Vapor [kPa (psi)]	Visc. Cinemática (cSt)	Pto. de Inflamación (°C)	Pto. Autoignición (°C)
Diesel Marino N°2	890	---	2 - 6 @ 40°C	60	257
Gasolina 84 Oct.	730 - 760	69 (10) @ 15°C	0.4-0.7 @ 37°C	< 0	280
Gasolina 90 Oct.	730 - 760	69 (10) @ 15°C	0.4-0.7 @ 37°C	< 0	280
Gasolina 95 Oct.	730 - 760	69 (10) @ 15°C	0.4-0.7 @ 37°C	< 0	280
Gasolina97 Oct.	730 - 760	69 (10) @ 15°C	0.4-0.7 @ 37°C	< 0	280
Turbo A1 (aviación)	775 - 840		8 @ -20°C	38	228
Diesel	810 - 880	---	1.3 - 4.1 @ 40°C	> 40	225
Etanol	785 - 809	5.9 -7.8 (1.1) @ 15°C	1.4 @ 40°C	12 - 16	363
B100	860-900	---	3.5 - 5 @ 40°C	> 101	---
Solvente 1 (Petroperú)	700 - 720	69 (10) @ 15°C	---	< 0	---
Solvente 3 (Petroperú)	750 - 800	---	---	37.8	---

*Fuente: Elaboración propia. Información tomada de MSDS de los productos de diferentes comercializadores.*

## 2.5 Metrología

La metrología es la ciencia de las mediciones y sus aplicaciones. Una medición es la comparación de un patrón contra un objeto o fenómeno, al cual se desea cuantificar una magnitud física. Una medición, por lo tanto, implica un patrón de medida y un objeto a medir. El resultado de la medición, la medida, es las veces en que el patrón es contenido en la magnitud del objeto a medir.

Como el proceso de medición implica instrumentos que pueden introducir incertidumbre en la medición, se requiere conocer la incertidumbre entre la magnitud medida y el valor real para considerarla en los procesos en los que se utilizará esta medida. En ciencia e ingeniería, se debe tener en cuenta el aporte de los instrumentos a la incertidumbre de una medición.

La OIML define Incertidumbre de medición como: *“parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza”*. (OIML, 2012)

Una definición que explica mejor el concepto es: *“Duda cuantificada acerca del resultado de una medición”* (ICONTEC, 2004). Es decir, que el resultado de una medición debe considerar un posible rango de desviación de esa medición.

Algunas de las desviaciones entre la medición y el valor real se repetirán de forma constante (error sistemático), estas son usualmente corregibles con métodos adecuados. Otras desviaciones tendrán patrones no definidos (errores aleatorios), los cuáles pueden tener orígenes diversos que pueden ser mitigados, pero pocas veces eliminados en su totalidad. De la necesidad de tener una referencia de cuán cercana es la medición de un instrumento al valor real de la magnitud medida, nacen los conceptos de Exactitud y Precisión, que deben ser entendidos claramente por las personas que construyen, suministran, adquieren y usan los instrumentos de medición.

### **2.5.1 Exactitud (*Accuracy*).**

La OIML define Exactitud como:

*“grado de concordancia entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando”*. (OIML, 2012)

La exactitud así definida implica la comparación de una sola medición con el valor de referencia. La diferencia entre estos valores es el “error” de dicha medición.

### **2.5.2 Precisión (*Precision*).**

La OIML define Precisión como:

*“grado de concordancia entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas”. (OIML, 2012)*

Para fines prácticos, este grado de concordancia se expresa numéricamente a través de la dispersión de los valores, utilizando el concepto de desviación estándar ( $\sigma$ ) como indicador de “precisión”, suponiendo que las mediciones se dan dentro de una “distribución normal”. La Tabla 3 lista el % de confiabilidad relacionado con el factor de cobertura aplicado a la desviación estándar.

*Tabla 3 - Confiabilidad vs Desviación estándar multiplicado por el factor de cobertura.*

Confiabilidad %	Desviación Estándar $\sigma$
68.2%	x1
95.4%	x2
99.6%	x3

*Fuente: Estadística Aplicada a los Negocios y la Economía (Lind, Marchal, & Wathen, 2012)*

Cada fabricante de medidores de caudal calcula este indicador en su laboratorio con el fin obtener la “precisión” de sus equipos. Usualmente, la precisión indicada en los manuales técnicos utiliza un factor de cobertura de 2, es decir que es equivalente a  $2\sigma$  para obtener una confiabilidad del 95%,

Por ejemplo, si en laboratorio un medidor mide repetidamente un volumen de 100 galones, y los resultados indican que su  $\sigma$  es de 0,01 galones, la precisión del equipo será de 0,02 galones. Esto nos indica que las mediciones efectuadas por este equipo, en un volumen de 100 galones, en un 95% de las veces, estarán entre 99,98 y 100,02 galones.

De forma general, la precisión está altamente ligada a la calidad en el diseño, fabricación y pruebas del equipo, por lo que, para adquirir un sistema de medición, se debe considerar proveedores con experiencia, así como pedir opinión de expertos, usualmente ingenieros que hayan trabajado en el sector.

### **2.5.3 Repetibilidad (*Repeatability*) y Reproducibilidad (*Reproducibility*).**

Ambos conceptos están relacionados a la “precisión”, dependiendo de las condiciones en las cuales se produce la medición.

Las condiciones de repetibilidad son definidas por el VIM como:

*“condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye el mismo procedimiento de medición, los mismos operadores, el mismo sistema de medición, las mismas condiciones de operación y el mismo lugar, así como mediciones repetidas del mismo objeto o de un objeto similar en un periodo corto de tiempo” (OIML, 2012).*

Las condiciones de reproducibilidad son definidas por el VIM como:

*“condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye diferentes lugares, operadores, sistemas de medición y mediciones repetidas de los mismos objetos u objetos similares” (OIML, 2012)*

En la práctica, los conceptos de precisión y repetibilidad indicados en los manuales de los equipos pueden ser tomados como equivalentes para la comparación de medidores de flujo. En el laboratorio de pruebas de los fabricantes es usual mantener el mismo procedimiento de medición, las condiciones de operación (estabilidad de flujo, producto), y el lugar.

La reproducibilidad amplía el concepto de repetibilidad, indicando que, el mismo medidor fuera del laboratorio, operado por otras personas, conectado a otros controladores, etc., va a mantener el grado de precisión indicado.

Las pruebas realizadas en los medidores para obtener la precisión de los equipos son realizadas bajo condiciones de laboratorio, donde caudales y presiones son controlados y estables. Sin embargo, al indicar las condiciones en las cuales debe trabajar el medidor para cumplir con los parámetros metrológicos indicados en la información técnica, los fabricantes asocian la repetibilidad con la reproducibilidad.

Los diferentes fabricantes alternan en la información técnica de los equipos, las palabras “precisión”, “repetibilidad” y “reproducibilidad”; sin mencionar las condiciones bajo las cuales se calcularon. En la práctica, para fines comparativos de la “precisión” de los medidores, se pueden considerar equivalentes.

#### **2.5.4 Intervalo de medición**

Coloquialmente conocido como “Rango” del instrumento, es definido por el VIM como:

*“Conjunto de los valores de magnitudes de la misma naturaleza que un instrumento o sistema de medición dado puede medir con una*

*incertidumbre instrumental especificada bajo determinadas condiciones”*  
(OIML, 2012).

El rango se entendería entonces como, el intervalo entre la mínima y máxima medida en el cual, el instrumento puede medir dentro del valor tolerable de incertidumbre (condición determinada). La determinación del rango válido de un equipo se obtiene con el estudio de su incertidumbre a distintas medidas. Con este, se determina la “Linealidad” del equipo.

### **2.5.5 Linealidad.**

El API, sobre “lineality”, indica en su vocabulario:

*“La curva ideal de exactitud de un medidor volumétrico es una línea recta, denotando un factor del medidor constante. La linealidad del medidor se expresa como el rango total de desviación de la curva de exactitud de dicha línea recta entre los caudales mínimos y máximos recomendados.” (API, 1994)*

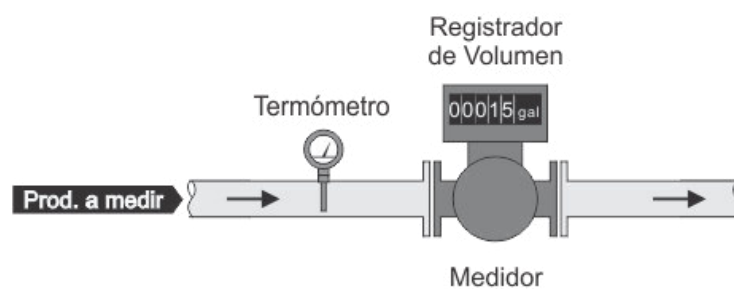
Linealidad se puede expresar como la máxima incertidumbre de las diferentes mediciones de un instrumento, a lo largo de su rango de operación.

### 3 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA PARA TRANSFERENCIA DE CUSTODIA.

#### 3.1 Componentes Básicos.

Los componentes principales que conforman un sistema medición dinámica de volumen para transferencia de custodia son: un medidor de flujo, un registrador mecánico o electrónico y un termómetro.

Estos 3 elementos son suficientes para medir y registrar el volumen bruto que pasa por el medidor, y calcular el volumen equivalente a una temperatura estandarizada.



*Figura 1- Sistema básico de medición para transferencia de custodia.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Los primeros medidores usados fueron mecánicos, del tipo desplazamiento positivo, con un registrador (llamado también contómetro) instalado sobre el eje de las piezas rotatorias. Luego se desarrollaron registradores capaces de corregir el volumen automáticamente mediante un bulbo lleno de líquido insertado en la tubería, de modo que, cambios de temperatura del producto en la línea se transforman en cambios de presión del líquido en el bulbo que, mediante un tubo capilar, transmite la información de la variación de la temperatura hacia un mecanismo calibrador que ajusta las revoluciones del eje del registrador.

Para los sistemas de medición utilizados en carga de camiones cisterna, se requiere preprogramar el volumen a despachar con la finalidad de entregar al cliente exactamente la cantidad requerida. Esto adicionó al sistema de medición, una válvula que detuviera el flujo una vez alcanzado el volumen preconfigurado. Inicialmente, la apertura y cierre de estas válvulas fueron de control mecánico accionadas por el registrador. A este sistema válvula-registrador, se le conoció como “preset”. Localmente, a la acción de introducir el valor de volumen preprogramado, se le conoce como “presetear”.

El desarrollo de la electrónica permitió el uso de sensores que registran el giro del eje del medidor para llevar esta información hacia un computador que realiza la integración del volumen. El uso del registrador electrónico abrió el campo para integrar componentes al sistema de medición, además de permitir el uso de otras tecnologías de medición de flujo, como lo son: la turbina, el medidor másico, el medidor ultrasónico, entre otros. Estos computadores también eran capaces de recibir e interpretar la señal de sensores de temperatura instalados en la tubería, permitiendo que el computador realice la corrección de volumen. El sistema “preset” también pasó al control del computador, quien ahora decidía cuando abrir o cerrar la válvula. Esto le permitió al sistema de medición ganar capacidades como: disminuir el flujo gradualmente al finalizar la descarga para mejorar la precisión en el volumen preconfigurado; controlar la velocidad del flujo para evitar carga estática y golpes de ariete, y cerrar la válvula en casos de emergencia. Localmente, al sistema electrónico de control de todos los componentes se le conoce como: “controlador de flujo” o “preseteador”.

En los 80’s, la tendencia hacia la automatización industrial hizo del sistema electrónico de medición un estándar en las terminales de hidrocarburos. En el Perú, estos se empezaron a usar al inicio de los 90’s.

El sistema electrónico de medición de volumen para transferencia de custodia, usados para carga de cisternas, tiene como componentes base: un medidor de flujo, un sensor de temperatura, una válvula de control, y un controlador de flujo conectado a los anteriores mencionados.

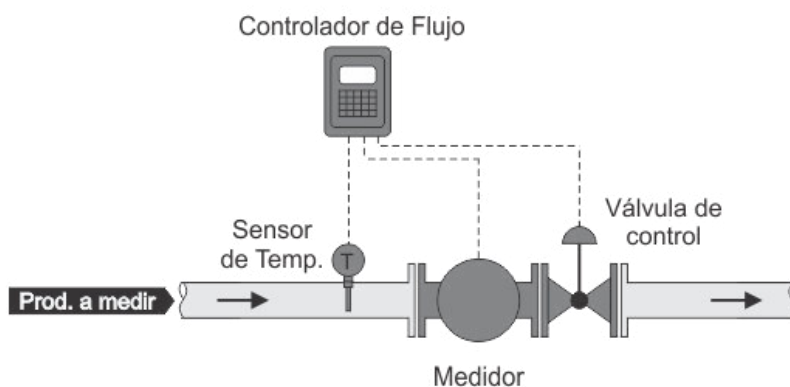


Figura 2- Sistema automatizado básico para carga de cisternas.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Medidor de Flujo.

La medición de volúmenes bajo transferencia de custodia puede ser realizada a través de mediciones directas de volumen, trasvasando manualmente producto de un punto a otro utilizando un recipiente de volumen finito conocido y aceptado. Este procedimiento es ineficiente en tiempo y recursos necesarios para medir grandes cantidades, además de no permitir la automatización del proceso.

Para la medición automatizada se utilizan instrumentos que pueden integrar las diferenciales de volumen a través de sistemas mecánicos o electrónicos. Algunos instrumentos miden la cantidad de producto desplazado dentro de la tubería, por medio de cámaras de volumen definido, que lo trasladan de la entrada a la salida del medidor (medición directa). Otros instrumentos miden la cantidad de producto detectando variables proporcionales al flujo en la tubería, para luego convertir este valor en volumen (medición indirecta). En ambos casos los resultados son corregidos por factores aplicados a la medición “bruta” del medidor, obtenidos durante la calibración del equipo. A este factor se le conoce como “Factor del Medidor” o “Meter Factor” (MF).

De los diferentes principios de medición que pueden ser utilizados para transferencia de custodia en carga de cisternas, el MPMS en el Cap. 5 (*“Metering”*) y Cap. 6 (*“Metering Assemblies”*), menciona y describe tres de ellos, por ser los más usados y estudiados para esta aplicación: Desplazamiento Positivo, Turbina y Coriolis; sin embargo, no descartar los otros principios. Esto responde al conocimiento que tienen los distintos miembros del API con estos medidores; tanto por la continua investigación, como por la experiencia en el uso de estas tecnologías. Dado que el API es el referente principal de la industria de Gas y Petróleo, en las Plantas de Ventas sólo se encuentran medidores de los 3 tipos mencionados.

Cabe indicar que los principales fabricantes de medidores pertenecen al grupo consultivo del API. Estos promocionan dentro de la asociación las tecnologías que desarrollan, por lo que es de esperar que, en los siguientes años, debido los avances de la electrónica, el aumento en la capacidad operacional de los procesadores, y la confianza que puedan ganar con el tiempo, otras tecnologías se sumen a las mencionadas en el MPMS.

#### 3.2.1 Medidores de Desplazamiento Positivo

También conocidos como medidores PD, por sus siglas en inglés (Positive Displacement meter) Los medidores de este tipo son aquellos que dividen el flujo en volúmenes



discretos de valor conocido, y contabilizan cuantas veces han desplazado este volumen desde la entrada hacia la salida del medidor. Los componentes internos son movidos por la energía del flujo, por lo que no requieren alimentación eléctrica para este fin. Cabe recalcar que esta tecnología viene siendo usada para transferencia de custodia desde 1930.

Existen 4 subtipos: Disco Oscilante, Pistón Oscilante, Pistón Alternativo y Rotativo. Nos enfocaremos en el último debido a que los principales proveedores de medidores para Terminales utilizan de este subtipo

En los medidores de tipo Rotativo, el movimiento de los elementos internos forma espacios cerrados de volumen conocido, llamados “cámaras de medición”. Dependiendo el fabricante del medidor, podemos tener formas diferentes de delimitar estos volúmenes.



Figura 3 - Medidores de Desplazamiento Positivo.

Fuente: Fotos tomadas de la web de los fabricantes ([www.brodieintl.com](http://www.brodieintl.com) y [www.technipfmc.com](http://www.technipfmc.com))

La compañía “Brodie International” posee 2 versiones de estos medidores (Brodie International, s.f.). El primero, cuenta con dos engranajes ovalados que, al girar, atrapan el líquido entre estos y la carcasa del medidor, definiendo la cámara de medición. La rotación completa de un engrane asegura que se ha desplazado dos veces el volumen de la cámara de medición. La frecuencia de giro de ambos engranajes está desplazada  $\frac{1}{4}$  de vuelta, por lo que el líquido atrapado por cada uno es entregado alternadamente a la salida del medidor.

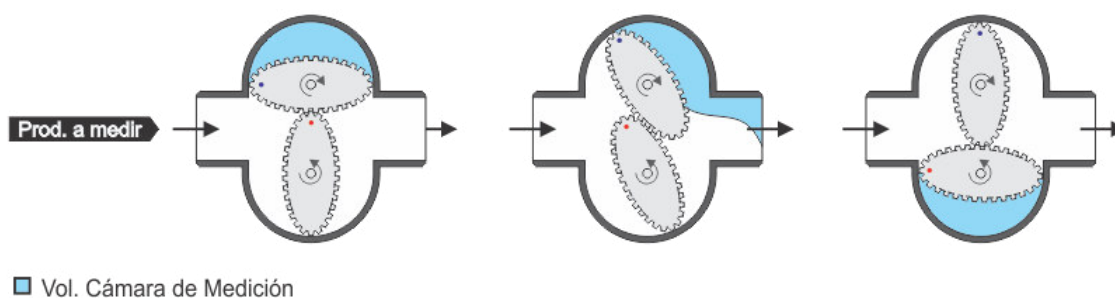


Figura 4 - Medidor de Desplazamiento Positivo, tipo Engranajes Ovalados.

Fuente: Elaboración propia.

El segundo medidor de Brodie (Brodie International, s.f.), nombrado como “BiRotor”, cuenta con dos espirales rotativas (tornillos sin fin) llamadas “rotores”, las cuales forman la cámara de medición, “atrapando” el líquido entre sus dientes y trasladándolo hacia la salida del medidor.

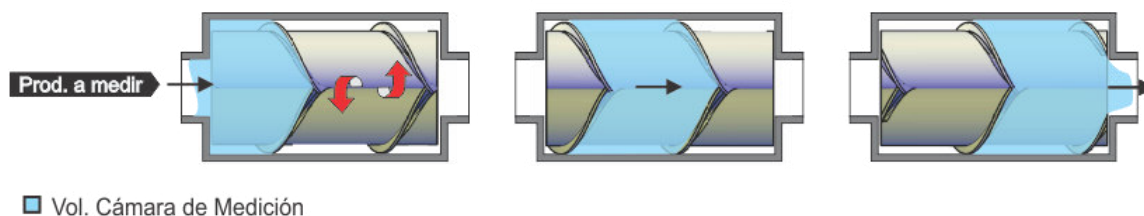


Figura 5 - Medidor de Desplazamiento Positivo, tipo BiRotor Brodie.

Fuente: Elaboración propia.

La compañía TechnipFMC (antes FMC, antes Smith Meter), cuenta con un medidor de paletas deslizantes las cuales definen la cámara de medición cada cuarto de vuelta. El volumen entre cada par de paletas determina una cámara de medición. Una rotación completa entrega 4 veces este volumen a la salida del medidor.

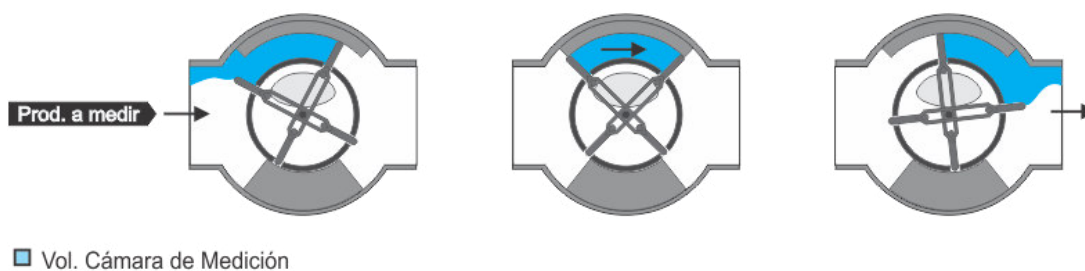


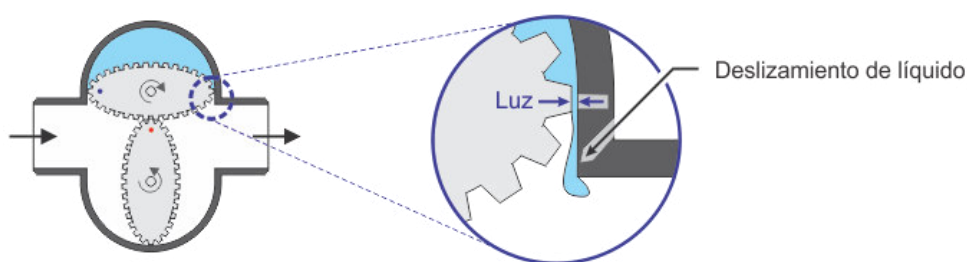
Figura 6 - Medidor de Desplazamiento Positivo, tipo Paletas Deslizantes – TechnipFMC.

Fuente: Elaboración propia.

La repetibilidad indicada del primer medidor es de 0,05% o mejor; que, si bien es bastante buena, es superada por los Birrotores y los medidores de Paletas Deslizantes, dado que sus fabricantes indican una repetibilidad de 0,02% o mejor. De estos, las linealidades indicadas se encuentran entre 0,075% y 0,15% dentro de sus rangos de medición más conservadores (TechnipFMC, 2020) (Brodie International, s.f.). La información respectiva se puede encontrar en los boletines técnicos de cada fabricante.

Debido a su alta precisión, los dos últimos son los que compiten en el mercado local de Terminales dentro del grupo de los medidores de Desplazamiento Positivo, sin existir un consenso de cuál es el más adecuado para el uso en las operaciones. Con los años, y gracias a la competencia entre ellos, ambos proveedores han mejorado los materiales de fabricación, han disminuido la cantidad de partes internas, y han reducido la caída de presión durante el funcionamiento del equipo. Por ejemplo, TechnipFMC posee modelos que no requieren desmontarse de la línea para realizar cambio de repuestos; por otro lado, Brodie ha simplificado el despiece para mantenimiento.

Se debe tener en cuenta que todos los medidores de Desplazamiento Positivo requieren pequeños espacios o “luces” entre sus piezas rotativas (como los engranes, paletas o los rotores) contra la carcasa. Por estos espacios puede existir un “deslizamiento” de líquido entre las cámaras de medición.



*Figura 7 - Deslizamiento de líquido en Medidores de Desplazamiento Positivo.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Usualmente estas luces son determinadas por los fabricantes en función a la viscosidad del producto a medir y las presiones en la línea, razón por la cual, estos datos deben ser parte de la información entregada al proveedor por parte del operador en el momento de la selección del modelo adecuado.

Cada giro del componente rotativo principal, dependiendo del tipo y tamaño del medidor, determina la cantidad de volumen de líquido que ha pasado a través de este. Por ejemplo, cada giro completo del rotor del medidor de paletas deslizantes implica que se ha transportado 4 veces el volumen de la cámara de medición correspondiente. Esta relación permite transmitir esta información, sea de forma mecánica a través de engranes a un registrador o vía pulsos electromagnéticos a un controlador de flujo. En ambos casos, una vuelta del engrane o un pulso, indican un múltiplo del volumen de la cámara de medición.

Los pulsos son generados por la interacción de elementos de alguna pieza rotativa asociada al eje del medidor, y un sensor conectado al controlador de flujo. Para mejorar la precisión de los medidores, estos se diseñan de tal modo que, un pulso represente el mínimo volumen posible, el cual está limitado por la capacidad de la electrónica de generarlos o identificarlos. Esto significa que, demasiada velocidad en el eje puede originar que la electrónica se “salte pulsos”, y por lo tanto se deje de contar volumen.

#### **viii. Ventajas y Desventajas de los Medidores de Desplazamiento Positivo**

El MPMS Capítulo 5.1 (API, 2005) indica las siguientes fortalezas en los medidores tipo PD:

- a. Capacidad para medir líquidos viscosos.
- b. Capacidad de funcionar sin alimentación eléctrica externa.
- c. Capacidad de registrar flujo cercano al cero.
- d. Diseño y operación de conceptos simples.
- e. No requiere acondicionamiento de flujo.
- f. Menos contrapresión requerida.

El mismo capítulo menciona las siguientes desventajas:

- a. Susceptibilidad a daños por sobrepresiones y descarga de bolsones de gas.
- b. Susceptibilidad a la corrosión y a la erosión.
- c. Severa reducción en el flujo si el medidor es atascado.
- d. Mayores requisitos de mantenimiento.
- e. Sensibilidad a los cambios de viscosidad en viscosidades de bajas.

### **3.2.2 Medidores Tipo Turbina.**

Los medidores de este tipo son aquellos que, mediante la velocidad de giro de un rotor con hélices (turbina) instalado en línea con la tubería, se infiere la velocidad media del flujo, y permite calcular el caudal, multiplicando el área de paso por la velocidad obtenida. Esta tecnología es mencionada por el API a partir de la década de 1970.



Figura 8 - Medidores tipo turbina y accesorios de acondicionamiento de flujo (derecha).

Fuente: Fotos tomadas de la web de TechnipFMC ([www.technipfmc.com](http://www.technipfmc.com))

La exactitud de la turbina se basa en dos asunciones: que el área permanece constante y que la velocidad del rotor representa fielmente la velocidad de flujo. (FMC Technologies, 2005).

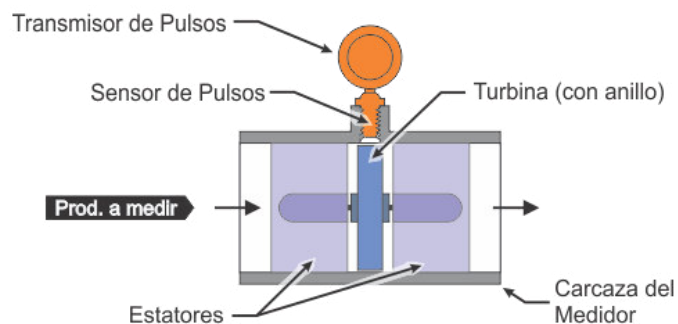
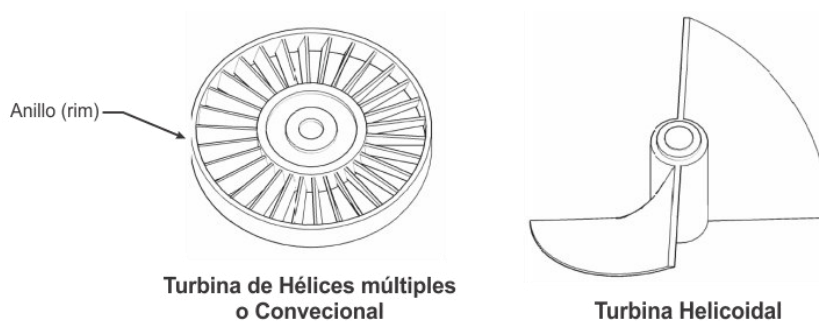


Figura 9 - Partes básicas de un Medidor de Turbina.

Fuente: Elaboración propia.

Existen básicamente dos tipos de turbinas de los medidores: Turbina de Hélices Múltiples o Convencional, que pueden tener o no un anillo (rim) en el diámetro externo; y Turbina helicoidal de 2 hélices (two-bladed helical turbine).



Turbina de Hélices múltiples  
o Convencional

Turbina Helicoidal

Figura 10 - Tipos de Turbinas.

Fuente:Elaboración propia.

La primera tiene mejor desempeño en su linealidad cuando opera con un número de Reynolds (Re) mayor a 30 000 (productos ligeros); y la segunda opera bien en regímenes

turbulentos de menor  $Re$ , lo que le permite trabajar con productos más viscosos, como el crudo mediano y pesado (FMC Technologies, 2005).

Para que la calidad de la medición del equipo sea la adecuada, se requieren ciertas medidas que aseguren que la frecuencia de giro de las hélices corresponda proporcionalmente a la velocidad del flujo.

#### **ix. Contrapresión.**

El movimiento rotativo de las hélices puede disminuir la presión manométrica a su alrededor, por debajo de la presión de vapor del líquido, siempre que la presión de entrada no sean lo suficientemente alta. Esto origina la vaporización del hidrocarburo, generando una distorsión en la medición. Además, el efecto de cavitación puede dañar los componentes internos del medidor.

Para evitar esta evaporación, se debe asegurar una contrapresión mínima en la sección de entrada del medidor. El capítulo 5.3 del MPMS recomienda una contrapresión mínima ( $CP_{min}$ ) de 2 veces la caída de presión del medidor a flujo máximo ( $\Delta P_{m\acute{a}x}$ ), más 1,25 veces la presión de vapor absoluta del líquido ( $PA$ ) a la temperatura de operación (API, 2005).

$$CP_{min} = 2 \Delta P_{m\acute{a}x} + 1,25 PA$$

#### **x. Acondicionamiento del flujo.**

Para que la medición de las turbinas sea la adecuada, se requiere idealmente que el flujo que pasa por el medidor sea “desarrollado”; es decir, que el perfil de velocidades se encuentre en estado estable por medio de las fuerzas viscosas en el fluido, y entre este fluido y la tubería. Esto implica también, evitar componentes rotacionales en el flujo. La distancia requerida para que el flujo se estabilice antes de ingresar al medidor, se conoce como “longitud de entrada”.

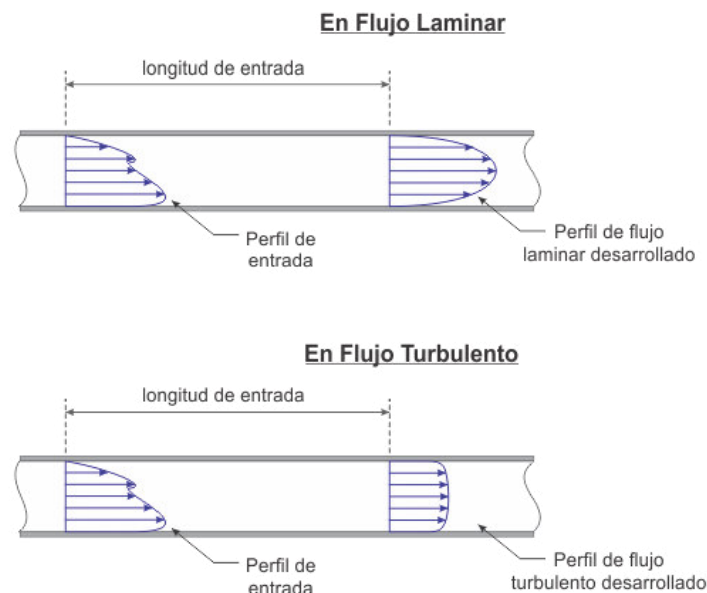


Figura 11 - Longitud de entrada.

Fuente: Elaboración propia.

Para alcanzar perfiles de flujo desarrollados, API recomienda, de forma general, instalar el medidor en una tubería recta, con no menos de 20 diámetros de largo aguas arriba del medidor, y 5 diámetros aguas abajo de este. Sin embargo, la configuración de la tubería cobra un papel importante para determinar la “longitud de entrada” aguas arriba del medidor, para lo cual API (API, 2005) propone el uso de una ecuación empírica que permite estimar dicha longitud.

$$L = (0,35D) \left( \frac{K_s}{f} \right)$$

Donde:

L = longitud aguas arriba de la tubería del medidor (en pies); D = diámetro nominal de la tubería del medidor (en pies);  $K_s$  = Ratio de velocidad de remolino (adimensional); f = Factor de fricción de Darcy-Weisbach (adimensional)

Existen 5 tipos posibles de configuraciones de la tubería previa al medidor. Cada una tiene un factor  $K_s$  distinto en función a como los accesorios previos pueden rotar el flujo (Ver Anexo B)

Como ejemplo, los valores calculados para la longitud de acondicionamiento de flujo en función de  $K_s$ , para una tubería de 4” de acero, para un caudal de 650 gpm de gasolina, con una viscosidad de 0.4 cSt sería:

$$L = 87,5 K_s$$

Y la relación L/D, bajo esas condiciones sería:

$$L/D = 21.88 K_s$$

Debajo una tabla resumen de los valores calculados para esta condición.

Tabla 4 - Valores calculados de Longitud de entrada para tubería de 4" con flujo de 650 gpm de gasolina.

Figura No	$K_s$	L (pulgadas)	L/D (pulgadas)
A-1	0.75	66	16
A-2	1.00	88	22
A-3	1.25	109	27
A-4	<i>Desconocido</i>		
A-5	2.50	219	55

Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar, en las posibles configuraciones se puede calcular la longitud de entrada para instalar un medidor tipo turbina, dado que todos los valores se conocen o son calculables; excepto en la configuración A-4 en donde no se cuenta con un factor  $K_s$  que permita predecir la longitud. Los codos en planos diferentes generan una rotación del flujo, compleja. Esta última configuración debe evitarse.

Existen accesorios que sirven para eliminar los remolinos y con esto disminuir o eliminar la necesidad de contar con una longitud de entrada antes de la turbina. Estos accesorios llamados “acondicionadores de flujo” ayudan a que, a la salida, el perfil de flujo se desarrolle completamente. También son conocidos como “enderezadores” o “alineadores, pudiéndose encontrar en el mercado: del tipo plato agujereado, y los de venas o tubos enderezadores.

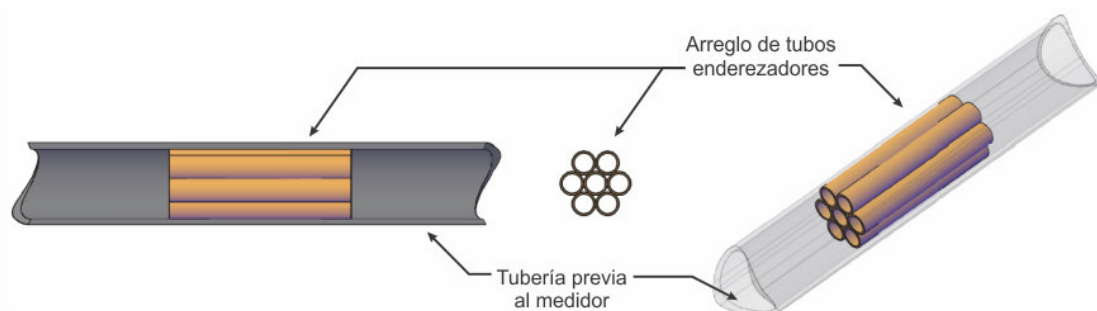
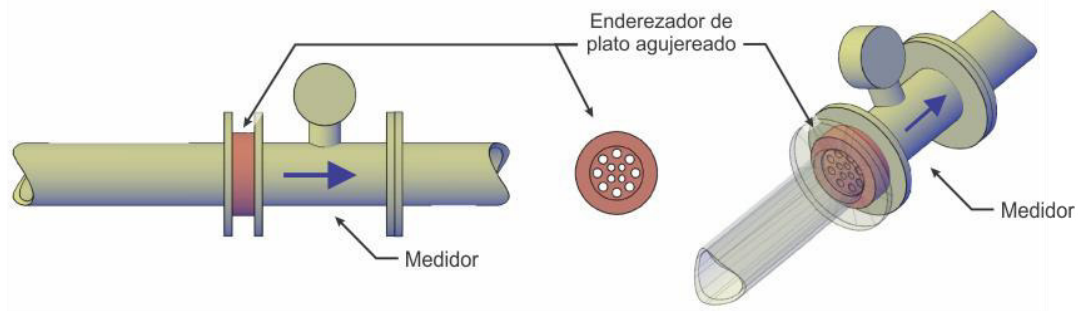


Figura 12 - Acondicionador de Flujo de tubos. Elaboración propia





*Figura 13 - Acondicionador de Flujo de plato agujereado.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Accesorios que eliminen la rotación del flujo, como un colador o filtro, instalados inmediatamente antes de un medidor de turbina, también puede disminuir notablemente la longitud de entrada requerida, pero no existe forma de predecir esta disminución, por lo que un estudio mayor sería requerido.

#### **xi. Ventajas y Desventajas de los Medidores tipo Turbina**

El MPMS Capítulo 5.1 (API, 2005) indica las siguientes fortalezas en los medidores tipo turbina:

- a. Amplio rango de flujo para medir líquido de baja viscosidad.
- b. Medidor de menor tamaño y peso relativo a sus correspondientes para las mismas condiciones de trabajo.
- c. Larga vida útil.
- d. Amplio rango de temperaturas y presiones de trabajo.

A estos se puede añadir:

- e. Pocas piezas móviles, lo que influye en los gastos de mantenimiento.
- f. Costo bajo por la simpleza de la tecnología.

En el mismo capítulo se mencionan las siguientes desventajas:

- a. Necesidad de acondicionamiento de Flujo.
- b. Necesidad de control de la contrapresión para prevenir errores por “flashing” y/o cavitación.

- c. Dificultad en la medición de líquidos de alta viscosidad (especialmente en turbinas convencionales multi aspas).
- d. Susceptible a suciedad y depósitos.
- e. Sensitivo a cambios de viscosidades a altas viscosidades (número de Reynolds bajo).
- f. Susceptibilidad a daños por descarga repentina de bolsones de gas u oleadas de flujo.

A estos se puede añadir:

- g. El cambio de la geometría de las hélices debido a la erosión, corrosión o depósitos de sólidos cambiaría el área efectiva de la turbina, alterando los parámetros iniciales del medidor.

### 3.2.3 Medidores Tipo Coriolis.

Los medidores del tipo Coriolis utilizan indirectamente el efecto del mismo nombre para calcular el flujo másico y la densidad del líquido en la tubería. De los 3 tipos de medidores mencionados, este es el de más reciente uso para transferencia de custodia. En el año 2002, se emite el Capítulo 5.6 del MPMS, específico para esta tecnología (API, 2002).



Figura 14 - Medidores Másicos tipo Coriolis.

Fuente: Fotos tomadas de páginas web de fabricantes ([www.emerson.com](http://www.emerson.com); [www.endress.com/en](http://www.endress.com/en) y [krohne.com](http://krohne.com))

*Se debe tener en cuenta que el medidor tipo Coriolis, a diferencia de los de tipo turbina y desplazamiento positivo, tiene la particularidad de requerir mayores variables a considerar en el cálculo de caudal (flujo másico y densidad), por lo que se requiere tener un buen entendimiento de la aplicación este efecto a la medición.*

### i. Sobre el efecto Coriolis aplicado al medidor.

El efecto Coriolis se basa en la fuerza aparente o ficticia que un observador, en un sistema de referencia en rotación, percibe en un objeto en movimiento. Esta “fuerza” es perpendicular al eje de rotación del sistema y aparenta acelerar o desacelerar el movimiento del objeto (Spurk & Aksel, 2008).

Para explicar mejor el efecto Coriolis, imaginemos que un cañón situado en el centro de un disco sin rotación dispara una bala a velocidad constante. La bala se desplaza en línea recta vista desde un punto de referencia del disco. Un observador en un sistema no inercial fuera del disco también observará un movimiento rectilíneo a velocidad constante.

Si hacemos rotar el disco en sentido antihorario, y disparamos la bala, el observador externo seguirá viendo que esta se desplaza en línea recta, mientras que el cañón rota alrededor del eje. Para el observador en el disco, la bala acelerará hacia la derecha, describiendo una trayectoria curva como se muestra en la figura.

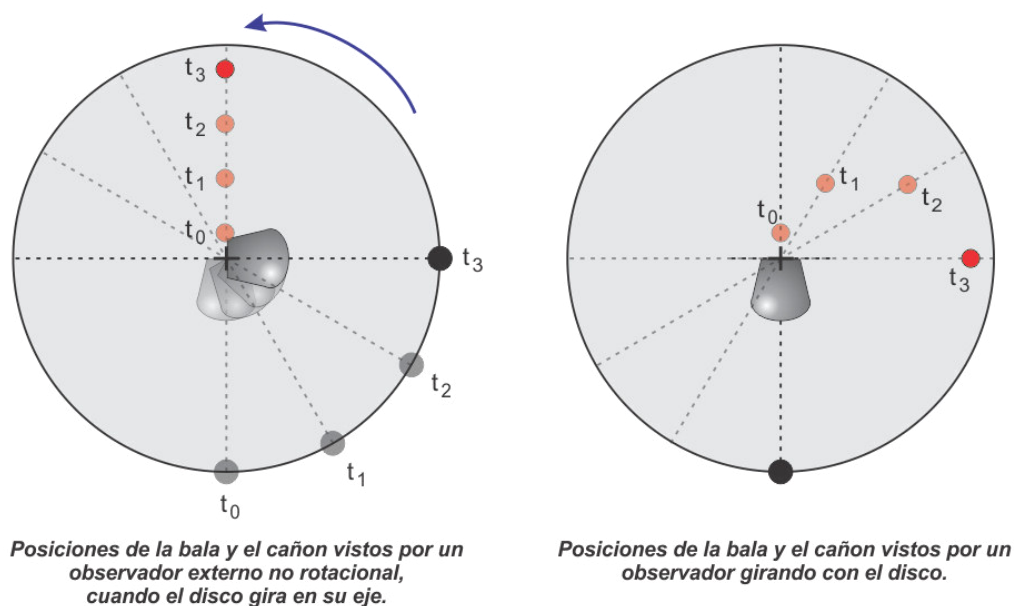


Figura 15 - Movimiento de bala desde puntos de referencia inercial y no inercial.

Fuentes: Elaboración propia.

La curvatura de la trayectoria de la bala, para el observador en rotación, se puede explicar desde su sistema de referencia, si sobre la bala se aplica una fuerza imaginaria, conocida como Fuerza de Coriolis. Si el observador en el disco quisiera mantener el desplazamiento de la bala en una trayectoria recta relativa a él, este deberá forzarla a girar junto con su sistema, para lo

que le deberá aplicar una fuerza hacia la izquierda. Si para este fin se utiliza un tubo recto fijo sobre el disco a la salida del cañón, al intentar mantener la bala en línea recta a través del tubo, el tubo deberá ejercer una fuerza hacia la izquierda. Por acción-reacción, la bala ejercerá una fuerza en la misma dirección, pero en sentido contrario sobre el tubo. En matemática vectorial, la “Fuerza Ficticia” que el observador en rotación asume que existe sobre la bala al curvar su trayectoria, se expresa de la siguiente forma:

$$F_c = -2m[\bar{\omega} \times \bar{V}_r]$$

Donde:  $F_c$  es la Fuerza de Coriolis;  $m$  es la masa del objeto;  $\bar{\omega}$  es la velocidad angular; y  $\bar{V}_r$  es la velocidad relativa del objeto al observador en el sistema de rotación. Recordemos que el operador “X” multiplica las componentes perpendiculares de la velocidad angular y la velocidad relativa. Notar también que el cambio de sentido de  $\bar{V}_r$  o de  $\bar{\omega}$ , afecta el sentido de la fuerza calculada.

Si un fluido pasa a través de una tubería en forma de U en el plano YZ, y hacemos girar la tubería por el eje Z, debido al efecto Coriolis aparecerán fuerzas sobre la tubería.

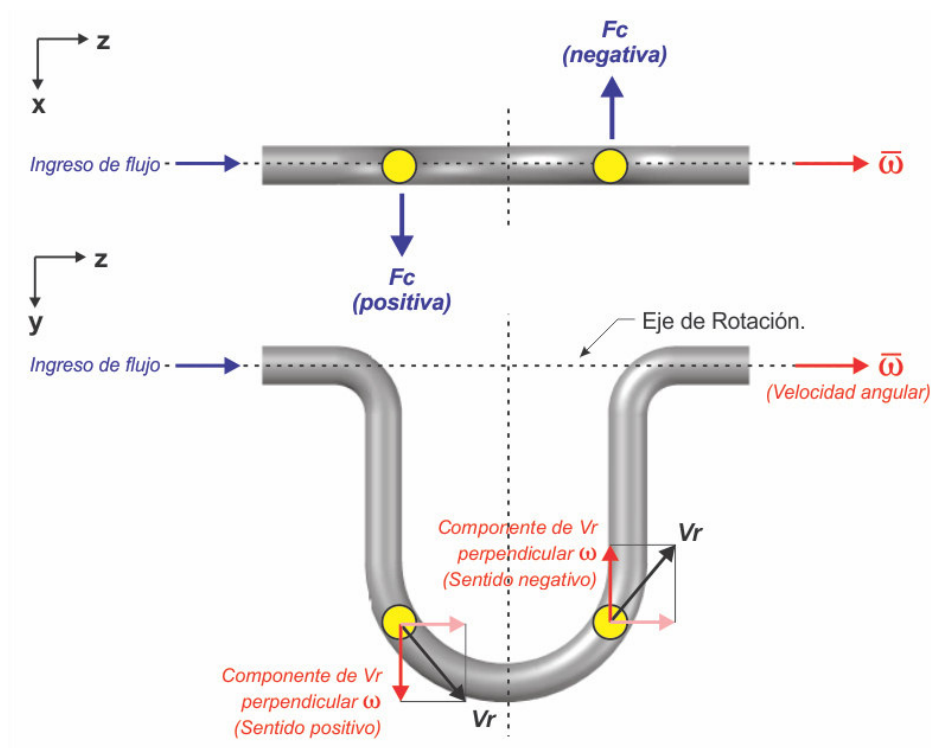


Figura 16 - Fuerzas sobre las tuberías internas del medidor tipo Coriolis durante rotación en sentido antihorario.

Fuente: Elaboración propia.

En la primera mitad del tubo, el elemento de líquido (círculo amarillo) se aleja del eje de rotación (componente de la velocidad  $V_r$ , perpendicular al eje); en cambio, hacia el lado de la salida el elemento se acerca. Esta diferencia genera que las fuerzas de Coriolis tengan sentidos contrarios en ambas mitades de la tubería, dando como resultado el torcimiento del tubo. Si la rotación del tubo la convertimos en un movimiento oscilatorio, el sentido de la oscilación determinará el sentido de las fuerzas sobre el tubo.

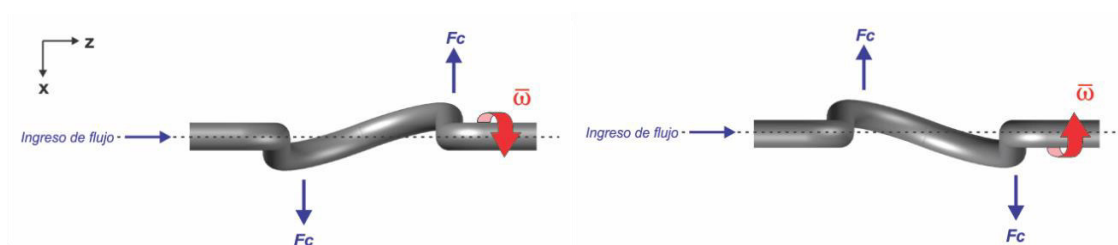


Figura 17 - Fuerzas sobre las tuberías internas del medidor tipo Coriolis durante la oscilación.

Fuente: Elaboración propia.

En el medidor de flujo másico tipo Coriolis, se aprovecha este efecto dividiendo el flujo que se quiere medir, por 1 o 2 tubos en “U” paralelos. Estos tubos son obligados a oscilar mediante unos imanes que repelen la parte más baja de ambos; mientras que las fuerzas de rigidez del tubo tratan de devolver a este a su forma original. El movimiento oscilatorio simula un movimiento rotacional en los tubos. Notar que, en este movimiento oscilatorio, la velocidad angular se invierte cada medio periodo, con lo que también se invertirían las fuerzas de Coriolis.

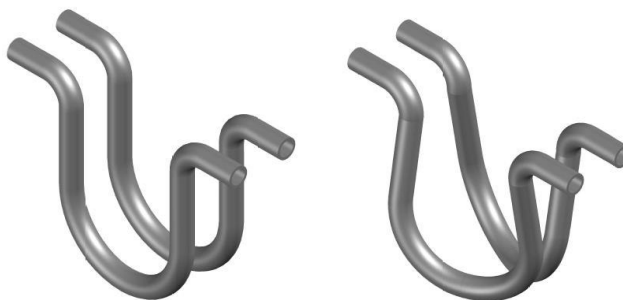


Figura 18 – Deformación de tubos de medidor tipo Coriolis oscilando, sin flujo (izquierda) y con flujo (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

En los tubos se instalan sensores que permiten registrar la posición de los tubos en cada sección, lo que permite conocer el comportamiento de la oscilación en cada sección de los tubos. Si el flujo es nulo, no aparecen las fuerzas que tuercen los tubos, estos oscilan en su

frecuencia natural, y los sensores indicarán que ambos extremos están sincronizados. Si hay flujo, los tubos se tuercen y los sensores detectan un desfase entre las oscilaciones. Este desfase es directamente proporcional al flujo másico.

La densidad del fluido que pasa por las tuberías afecta directamente a la frecuencia natural de oscilación del conjunto tubo-fluido, tal como ocurre en un sistema masa-resorte clásico: a mayor masa menor frecuencia. Esto permite que, al conocer la frecuencia de oscilación de los tubos del medidor, se pueda calcular la densidad del flujo.

Al poner en marcha el medidor, el registro de la vibración natural a flujo cero es obligatoria. Un error en este procedimiento puede generar errores en las mediciones. Se recomienda seguir los pasos de puesta en marcha recomendados por cada fabricante. Para esto, se recomienda tomar como referencia el punto 8.1 del MPMS Capítulo 5.6.

## **ii. Ventajas y Desventajas de los Medidores tipo Coriolis**

El MPMS Capítulo 5.1 (API, 2005) indica las siguientes fortalezas en los medidores tipo Coriolis:

- a. Bajo mantenimiento – mínimo efecto por sustancias abrasivas y corrosivas.
- b. No susceptible a daño por bolsas de gas.
- c. Capacidad de registrar flujos cercanos a cero.
- d. Mínimo efecto por cambios de viscosidad.
- e. Medición directa de masa y densidad.
- f. Acondicionadores de flujo no son normalmente requeridos.

En el mismo capítulo se mencionan las siguientes desventajas:

- a. Sensibilidad a las condiciones de instalación. Incluidos golpes y vibraciones.
- b. Acumulación de depósitos internos pueden afectar la exactitud.
- c. Tamaños mayorea a 6 pulgadas no son usados para aplicaciones de transferencia de custodia.
- d. Algunas veces son difíciles de calibrar/verificar debido al retraso de la salida de pulso.

- e. El medidor requiere periódicamente ajustar el “cero” bajo presión, sin flujo.
- f. Necesita control de contrapresión.
- g. Alta caída de presión.

Adicionalmente se puede indicar sobre este tipo de medidor, lo siguiente:

1) Si el producto a medir se comercializa en unidades de masa, el uso de un medidor másico es recomendado; con este se evita la instalación de un medidor de densidad en la línea, que sí sería requerido por los medidores tipo desplazamiento positivo y turbina. Ejemplos de esta aplicación son la venta de GLP o asfaltos.

2) Se debe tener en cuenta que estos medidores suelen incorporar termómetros referenciales para poder corregir las variaciones de diámetro de la tubería por efectos de temperatura. Estos no necesariamente son instalados en contacto con el fluido, por lo que se debe evaluar su utilización para los cálculos requeridos en transferencia de custodia.

### **3.3 Controlador**

Debido a las necesidades de las terminales de poder automatizar una serie de procesos como: la corrección de volumen despachado, almacenar información de los despachos realizados; imprimir tickets; enviar información a un sistema superior de control o supervisión; enviar comandos para el encendido de bombas; comunicarse con periféricos del sistema exigidos por la normativa (como sensores de sobrellenado); automatizar la inyección de aditivos y colorantes; contar con controles de acceso al despacho; entre otros, se ha estandarizado la inclusión de controladores electrónicos al sistema de medición. Estos son capaces de recibir información de varios medidores y de los sensores de temperatura y presión de la línea; información que es interpretada y procesada, de modo que se pueden controlar los caudales a través de una válvula de control, regulando el flujo que pasa por los medidores (TechnipFMC, 2017). Esto permite realizar las tareas de mezcla en línea de productos como la gasolina y el alcohol, o el diésel y el biodiésel. Otras tareas de los controladores son las de servir como interfase hombre-máquina, comunicarse con otros sistemas (como el sistema de aditivación) o controlar equipamiento adicional (como barreras de control de acceso); en general, realizar procesos automatizados, ahorrando recursos.

Estos controladores son conocidos localmente como: controladores “de carga”, “de flujo” o “de despacho”.



*Figura 19 - Controladores de Despacho actuales.*

*Fuente: Información Técnica de los fabricantes.*

Los controladores de despacho se vienen usando desde finales de la década de los 70's y, conforme se ha desarrollado la electrónica, han estado en constante aumento de sus capacidades de procesamiento, almacenamiento informático, control y comunicación. Hoy en día el estándar de facto de equipos electrónicos ha llevado a que estos sean capaces de comunicarse mediante protocolos de internet, pudiendo acceder a ellos directamente desde ubicaciones remotas a través una dirección IP.

### **3.4 Válvula de control**

Es una válvula comandada por el controlador de flujo, en función a las necesidades del despacho. Estas pueden ser de varios tipos, siendo las más usadas en el Perú las de tipo electrohidráulica y electroneumática.

Para los sistemas de despacho, la válvula de control realiza las siguientes funciones:

- a) Iniciar y finalizar el despacho de producto.
- b) Controlar el caudal.
- c) Detener el flujo en caso de emergencias.

En las Terminales de ventas de productos blancos operadas por Petroperú, predomina el uso de las válvulas electrohidráulicas cuyo accionamiento se realiza a través de un conjunto diafragma- resorte en el cuerpo de una válvula globo.



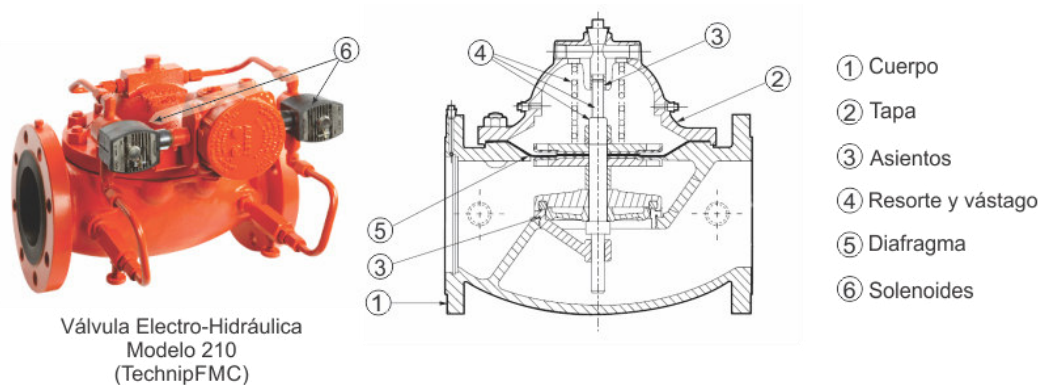


Figura 20 - Válvula de Control Electro-Hidráulica.

Fuente: Model 210 Digital Electro-Hydraulic Set-Stop (TechnipFMC, 2017)

Estas válvulas de control poseen dos válvulas solenoides conectadas al controlador, que transmiten las presiones de la entrada o de la salida del flujo, hacia la cámara entre la tapa y el diafragma, permitiendo la ecualización de las presiones entre la cámara y el cuerpo de la válvula, con lo que se logra controlar la apertura o cierre del obturador (TechnipFMC, 2017).

### 3.5 Sensor de Temperatura

La medición dinámica de la temperatura del flujo en un sistema de transferencia de custodia cumple la función de poder transformar el volumen medido, a un volumen a temperatura estandarizada, mientras pasa por el medidor. Esto permite que, sin importar la dilatación o contracción debido a las variaciones de temperatura del líquido, se pueda obtener un volumen normalizado del bien entregado.

La variación de temperatura en los tanques de almacenamiento durante el día puede crear la ilusión de pérdida o ganancia de producto cuando se miden los volúmenes restantes en los tanques al final de la jornada de despachos. Para una Terminal, realizar un correcto balance del almacenamiento es primordial. Los operadores facturan al dueño de la Terminal por custodia de la cantidad de producto en los tanques. Estos tanques también deben contar con sensores de temperatura para normalizar el volumen almacenado. Información respecto a la medición de temperatura en tanques, se puede encontrar en el MPMS Capítulo 7, Sección 3.

Los sensores electrónicos de temperatura generalmente usados para medición dinámica son: Termistores y Detectores de temperatura de resistencia o RTD, por sus siglas en inglés (API, 1995). Ambos cambian su resistencia a la corriente eléctrica en función de la temperatura

del medio. La diferencia entre estos es que, el elemento resistivo del primero es un semiconductor, y del segundo una bobina de metal, usualmente níquel o platino.

Si bien, el termistor, tiene menor tiempo de respuesta al cambio de temperatura y su exactitud es mejor que la del RTD, este último es de mayor difusión de uso debido principalmente al comportamiento lineal en la relación resistencia-temperatura y a su menor costo de fabricación. Además, su discriminación de temperaturas se encuentra dentro del  $0,5^{\circ}\text{C}$  ( $1,0^{\circ}\text{F}$ ) requerido por el API para boletas de medición.

Se exige que estos sensores sean instalados de tal manera que su bulbo de medición esté en contacto directo con el flujo de líquido, o a través de un termopozo construido por un metal compatible con el líquido para evitar corrosión, de preferencia acero inoxidable 304 o 316. La instalación de estos sensores debe realizarse lo más cerca posible al medidor, y si es factible, dentro de él. En caso se instale en la tubería alemana, se deberá ubicar en el tercio central de la tubería, teniendo la precaución de colocar el bulbo sensor a suficiente distancia de la zona de líquido que pueda verse afectada a cambios de la temperatura del tubo debido a factores externos (API, 1995).

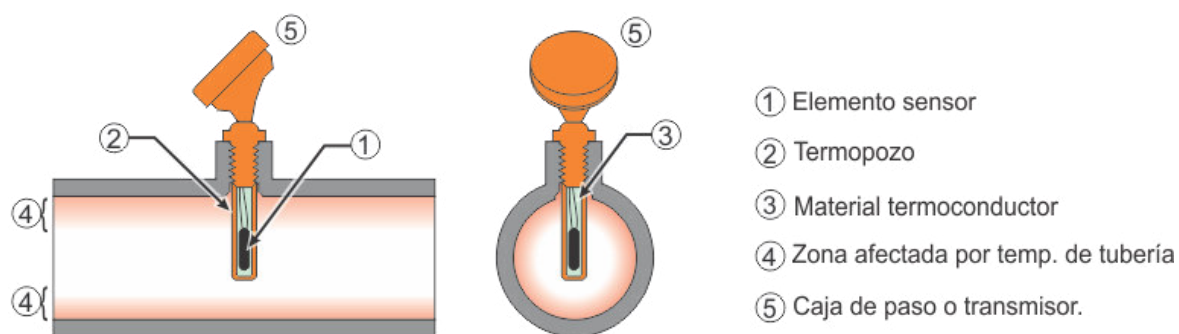


Figura 21 - Instalación de sensor de temperatura en tubería.

Fuente: Elaboración Propia

La instalación de un termopozo requiere el uso de un material termo-conductor para asegurar que la temperatura se transmita correctamente al sensor. Usualmente se utiliza una pasta térmica, como la usada en la disipación de calor en los procesadores de computadoras.

### 3.6 Sistemas periféricos.

Adicionalmente, por seguridad, la normativa local exige el uso de equipos que sean capaces de informar de dos situaciones potencialmente peligrosas: 1) la existencia de carga eléctrica en

la cisterna, y 2) el rebalse del combustible por sobrellenado de la cisterna. Para esto, se deben considerar sistemas que monitoreen ambas situaciones en el proceso de despacho, que sean capaces de “avisar” al controlador que las condiciones para iniciar o continuar, son seguras.

Otros sistemas adicionales que son básicamente obligatorios son los que se encargan de inyectar químicos para mejorar las propiedades del combustible o para identificarlo.

### **3.6.1 Monitor de Puesta a tierra.**

En los camiones cisterna, la fricción de componentes propios del vehículo (como las fajas), la fricción del aire sobre la armadura del tanque durante el transporte, o la inducción por elementos eléctricos (como el dínamo para la carga de la batería), pueden generar carga estática en el vehículo. Esta debe ser eliminada de forma controlada antes del inicio del despacho de combustible para evitar chispas que puedan generar la ignición de gases combustibles.

Durante el proceso de carga, el flujo del combustible a través de la tubería y de las mallas de los filtros, y la salpicadura del líquido contra las paredes del compartimento (especialmente al inicio de la carga), también pueden generar cargas estáticas que deben eliminarse.

Para asegurar que la cisterna no guarde carga estática, se requiere de un sistema que descargue la carga a través de una conexión a tierra, y confirme que la carga se mantiene nula durante el despacho. El Sistema de Puesta a Tierra de una isla de carga está compuesto básicamente por un pozo a tierra de menos de 10 Ohm (API, 1998), de una línea a tierra conectada al camión cisterna, y de un componente electrónico que monitoree la carga estática.

El camión cisterna y el Sistema de Puesta a Tierra se conectan a través de un cable del monitor, que se fija al camión mediante un conector. Usualmente el conector es una pinza que se coloca en una placa metálica unida al chasis del camión cisterna. También hay la posibilidad de utilizar otros tipos de conectores, pero, estos requieren de un conexionado especial en el vehículo o del suministro de accesorios adicionales. Se debe asegurar que el camión y la cisterna estén cableados entre sí, de modo que, al conectar la tierra en alguna de las dos secciones, tengamos certeza que el conjunto está aterrado.

Una vez conectado el cable de tierra a la cisterna, el monitor debe verificar que no exista carga estática, para luego indicar que se puede iniciar el despacho. Este aviso se realiza mediante un indicador luminoso (usualmente verde), una señal de desbloqueo al controlador de

carga, o ambas. Durante el despacho, en caso se encuentre carga, el monitor lo indica mediante una luz (usualmente roja) y para la descarga a través del controlador.



*Figura 22 - Monitores de Puesta a Tierra con conector tipo Pinza*

*Fuente: Información Técnica de Fabricante (www.scully.com y www.newson-gale.com)*

### **3.6.2 Monitor de Sobrellenado.**

En un sistema automatizado, el controlador es el responsable de detener la carga de combustible cuando se totalice la cantidad indicada al inicio del despacho. Este volumen siempre debe ser menor al volumen máximo del compartimento que se llenará. Sin embargo, es posible la existencia de condiciones que puedan derivar en un rebose de la cisterna, generando un derrame. Estas condiciones pueden ser errores humanos como: ingresar al controlador un volumen de despacho mayor al requerido, no haber vaciado completamente el compartimento, conectar el brazo de carga en un compartimento de menor capacidad. También puede ocurrir por fallas de algún componente del sistema, como pueden ser la falla de la válvula de control o de un medidor descalibrado que registre menos volumen del que se entrega.

Para prever que no ocurran rebose de la cisterna, se requiere un sensor que continuamente registre si el nivel máximo seguro del compartimento es alcanzado y, de ser así, ejecute acciones para detener el flujo. A este sistema se le conoce como “Sistema de Sobrellenado”. Este avisa a sistemas superiores (como el controlador o un PLC) para que se ejecuten acciones como: cerrar las válvulas de control y apagar las bombas asociadas.

El Sistema de Sobrellenado requiere de sensores en la cisterna, un monitor en la isla en comunicación con el Controlador de Flujo, y de la conexión entre los sensores y el monitor. Los camiones cisterna deben contar con sensores de nivel en la parte alta de cada compartimento. Estos estarán cableados a una toma en la cisterna, que se conectará al monitor a través de un cable con un conector estandarizado.



Figura 23 - Toma (en cisternas) y plug (cable del monitor) estándar para Sistemas de Sobrellenado.

Fuente: Información Técnica de los fabricantes. Fabricante ( [www.liquip.com](http://www.liquip.com) y [www.scully.com](http://www.scully.com) )

Los sensores usados en los camiones cisterna son de dos tipos: termistor y óptico. El termistor es un sensor basado en un elemento semiconductor que cambia su resistividad en función a la temperatura. Para la aplicación, el elemento es protegido por un termopozo. Cuando el líquido en el compartimento toca el termopozo, este transfiere el cambio de temperatura al elemento sensible cambiando la resistividad del sensor.

El sensor óptico, está compuesto por un led emisor de luz infrarroja, un fototransistor que recibe la luz emitida y, un prisma donde se instalan los otros elementos y en donde el haz rebota para alcanzar el fototransistor. El principio de detección de nivel se basa en la atenuación del haz infrarrojo que rebota dentro del prisma cuando queda sumergido. El líquido absorbe parte de la luz emitida por el LED.

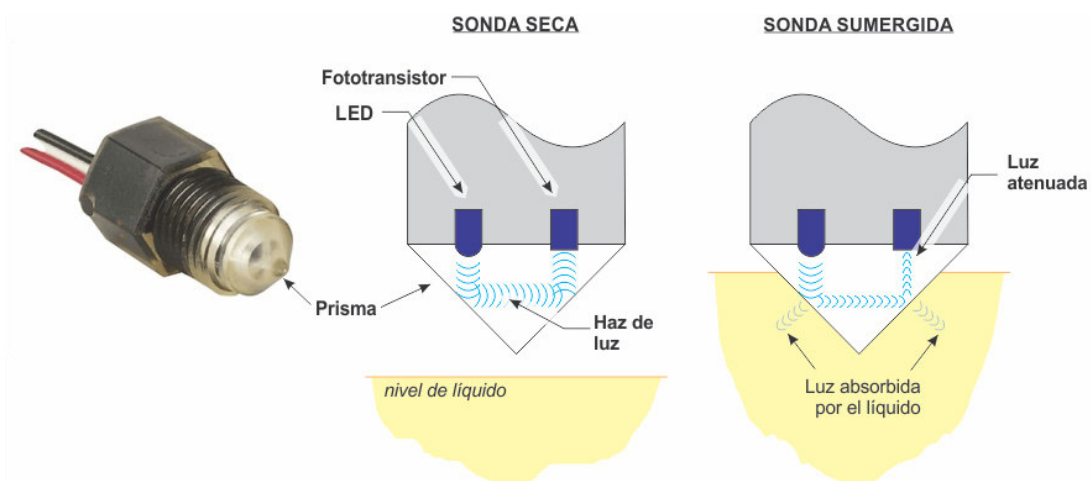


Figura 24 - Funcionamiento del Sensor Óptic.

Fuente: Elaboración propia.

Tanto en el sensor óptico como en el termistor, el cambio de la señal (disminución de la intensidad de luz o cambio de resistencia) es registrada por el monitor de sobrellenado, el cual comunica a un sistema superior que debe detener el flujo de despacho para evitar un derrame.

### **3.6.3 Sistemas de inyección de aditivos.**

Los aditivos son productos químicos utilizados para cambiar las características del combustible y darle propiedades que beneficien al medio ambiente y al rendimiento del vehículo. Los aditivos proporcionan características particulares a los combustibles, como:

- Aumento de octanaje para mejor rendimiento del motor.
- Prevención de la corrosión.
- Estabilización de la gasolina.
- Disminución de compuestos no amigables con el ambiente en la combustión.
- Disminución de la temperatura de congelación.
- Disminución de la capacidad de almacenar carga estática.
- Disminución de azufre en el diésel.
- Lubricación.
- Color.

Cada empresa de Estaciones de Servicio (Primax, Pecsá, Petroperú, Numay, Petroamérica, entre otras) diferencia su producto con el aditivo que se adiciona al combustible. Por ejemplo, si la empresa A y B cargan combustible en la misma terminal, su gasohol de 90 octanos es el mismo en ambos casos, hasta que se agrega el aditivo respectivo, antes de salir de la Terminal.

Según la experiencia de RESERTEC S.R.L., los aditivos suelen ser productos de alta concentración, viscosos, tóxicos y de muy alto costo. Debido a su concentración, estos se agregan en pequeñas proporciones, que pueden llegar a relaciones de 1 en 10 000. La adición de los aditivos se puede realizar de forma manual al final de la carga del camión cisterna, o durante la carga por medio de sistemas automatizados que inyectan el aditivo en pequeñas dosis en función al caudal del hidrocarburo despachado.

El D.S. N° 045-2001-EM hizo obligatorio en nuestro país a partir del año 2002, el uso de sistemas de dosificación fijos que inyecten los aditivos directamente a la tubería de llenado de combustible hacia las cisternas. Eso se conoce como aditivación “en línea”.

Esta exigencia, obligó a que los controladores de despacho instalados contasen también con la capacidad controlar la entrega del aditivo a lo largo de la carga de las cisternas. Esto permite que el aditivo esté mejor distribuido en el compartimento, que si se vierte al final de la carga. Debido a que la proporción volumétrica del aditivo está en el orden de 1 unidad de volumen por cada 5 000 a 10 000 de producto principal (dependiendo de cada distribuidor), las cantidades a inyectar son muy pequeñas para que sean medidas con precisión por un caudalímetro en una entrega continua. Por esta razón, los sistemas de aditivación realizan la inyección de la dosis requerida de aditivo por cada volumen predefinido que pasa por el medidor (por ejemplo, cada 100 galones). A esta forma de aditivación se le conoce como “inyección por lotes”.

Existen básicamente 2 formas de controlar estas inyecciones. La primera, por inyección de volúmenes discretos, donde un recipiente de capacidad determinada es llenado de forma automática por una línea presurizada, para esperar a que el controlador decida el momento en que debe realizarse la inyección. Para esto abrirá una válvula solenoide que conecta el inyector a la línea de despacho, inyectando el aditivo con un émbolo (como en una jeringa médica), o por la presión almacenada en el recipiente (como en una botella de pintura en aerosol), repitiéndose el proceso las veces que se necesite.

La segunda, es por control de inyección a través de la medición de volumen de aditivo. El inyector cuenta con un medidor de bajo caudal que informa al controlador la cantidad de aditivo que se va inyectando. Las inyecciones de las dosis se realizan en periodos cortos de tiempo, y espaciados durante el despacho, permitiendo que el caudal de aditivo que pasa por el medidor del sistema esté dentro de su rango de trabajo. La línea es presurizada por bombas de desplazamiento positivo y, al igual que en la primera forma de control, el inyector espera a que el controlador abra la válvula solenoide para entregar el aditivo; con la diferencia que el caudal es medido por el controlador, quien ordena cerrar la válvula solenoide cuando se haya entregado la dosis correspondiente para ese lote. El controlador acumula el volumen y recalcula las dosis que se debe entregar en la siguiente inyección.

Este inyector suele estar conformado básicamente por una válvula solenoide y un medidor de tipo desplazamiento positivo.

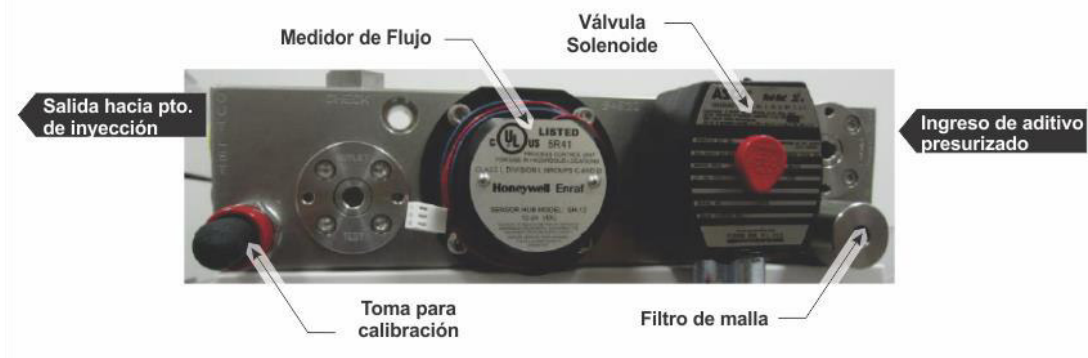


Figura 25 - Partes de un inyector de aditivos con medición de volumen, tipo monobloque.

Fuente: Elaboración propia, con foto tomada de información del fabricante ([www.honeywellprocess.com](http://www.honeywellprocess.com)).

Los medidores de estos sistemas suelen tener un caudal mínimo de medición de alrededor de los 0.02 gpm. Si bien este valor puede ser suficiente para algunos casos, no es recomendable trabajar en los extremos del rango de medición, porque se puede perder precisión.

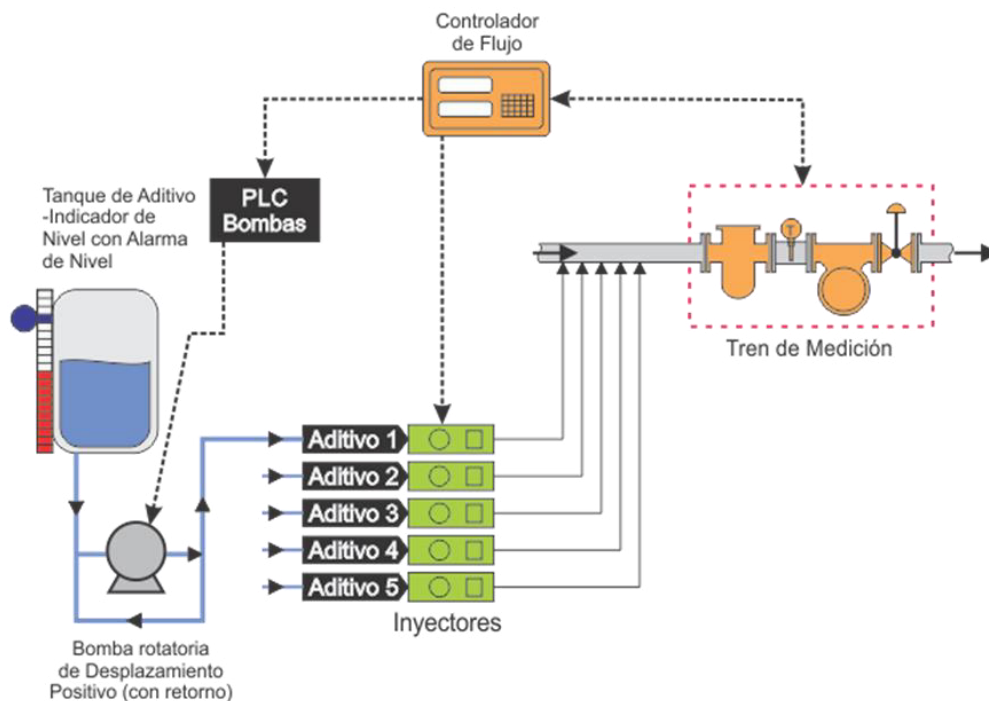


Figura 26 - Sistema de aditivación típico.

Elaboración Propia.



Debido a que las bombas de desplazamiento positivo entregan un flujo constante, y presiones que superan altamente las pérdidas hidráulicas (que pueden llegar a los 1000 PSI), las tuberías son protegidas con válvulas de alivio en una línea de retorno al tanque de aditivo. Según la experiencia de RESERTEC S.R.L., la presión de apertura de las válvulas de alivio se configura por debajo de la presión de diseño del sistema de tuberías. Suelen configurarse a 115 psi, pero siempre se puede regular según el requerimiento del usuario.

### **3.7 Otros componentes.**

#### **3.7.1 Filtro de malla o Colador**

Para evitar daños en los componentes internos de los medidores y válvula de control debido a sólidos que se puedan encontrar en la línea, se debe instalar antes de estos componentes un colador o filtro de malla (también son conocidos por su nombre en inglés: “strainer”). La malla usada tiene una apertura estándar de “40 Mesh”, equivalentes a 0,38 mm (TechnipFMC, 2017). Medidas menores o mayores pueden ser usadas en función de la experiencia del operador de la planta.

#### **3.7.2 Brazo de Carga y Acople.**

El brazo de carga es el componente por el cual se descarga el hidrocarburo desde la línea de despacho hacia la cisterna, sea por una escotilla por encima del tanque, o por un acople en la parte inferior. Está compuesto principalmente por un conjunto de juntas giratorias unidas por tuberías y mangueras; así como de contrapesos o resortes que permiten contrarrestar el peso para su fácil manipulación.

Si bien el uso de una manguera reforzada para la carga de cisternas es la solución más económica, el peso de la manguera llena de líquido dificulta la manipulación de los operadores, además de que la cargar diariamente este peso puede generarles daños en los huesos y músculos. Se debe considerar también que el arrastre permanente contra el piso desgasta el material de la manguera pudiendo provocar ruptura de la manga y fuga de producto.

En Perú, desde 1998 (D.S. 030-98-EM) se exige que las gasolinas y diésels sean despachadas por el fondo de la cisterna. Localmente, estos brazos son conocidos por su nombre en inglés: “Bottom Loading”.



*Figura 27 - Primeros brazos de "carga por el fondo" en Perú (1999), Terminal Callao - Petroperú.*

*Fuente: Terminal Callao - Petroperú (1999)*

El acople estandarizado utilizado en los brazos de carga por el fondo es conocido como acople API, debido al estándar usado para su diseño (API RP 1004). Este define las dimensiones que debe tener y que son utilizadas por cada fabricante independientemente de las mejoras de diseño propias.

La dimensión estándar de estos acoples define indirectamente el diseño mecánico del sistema de carga, ya que corresponden a tuberías de diámetro nominal de 4". Aguas arriba, los brazos de carga, tuberías y elementos de la línea principal quedan limitados a diámetros de 4" o menos.



*Figura 28 - Acople API de la marca OPW, modelo LYNX.*

*Fuente: Foto tomada de información Técnica del fabricante ([www.opwglobal.com](http://www.opwglobal.com)).*

### **3.8 Despacho de gasolinas en Plantas de Ventas del Perú.**

Un sistema automatizado típico de despacho de gasolinas con mezcla en línea, en Terminales Mayoristas del Perú, debido a la normativa local mencionada, debe contener los siguientes componentes:

- Controlador de Despacho.
- Tren de medición de alcohol carburante: Filtro, Medidor (con accesorios), válvula de control, sensor de temperatura.
- Tren de medición de Gasolina o de Gasohol: Filtro, Medidor (con accesorios), válvula de control, sensor de temperatura.
- Líneas de conducción desde tanques de Alcohol y Gasolina.
- Sistema de bombeo, de no usarse despacho por gravedad.
- Sistema de aditivación (con controlador en comunicación con el controlador de despacho, o sin él).
- Sensores de sobrellenado de Cisterna y de Puesta a Tierra.
- Brazo de carga por el fondo o “Bottom Loading”.

A continuación, se muestra en esquema que resume los instrumentos de un sistema de despacho de gasolina para transferencia de custodia, con mezcla en línea y aditivación, incluyendo los sistemas adicionales mencionados.

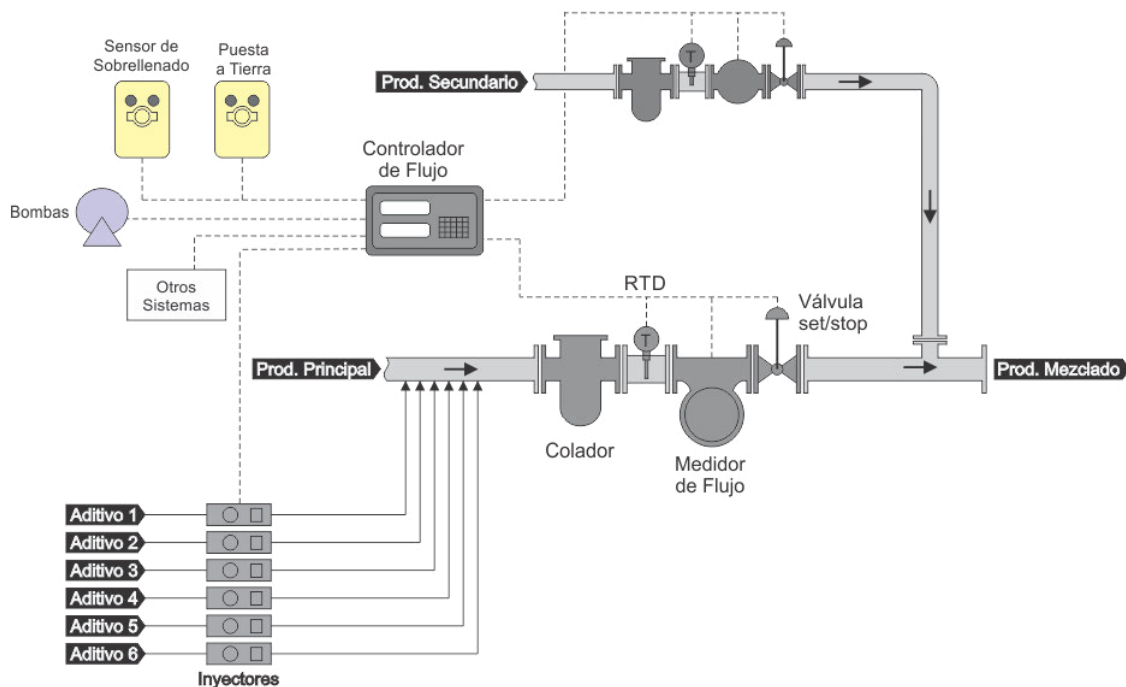


Figura 29 - Sistema de Medición automatizado estándar, con mezcla en línea en configuración “Ratio Blending”.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.1 Configuraciones de medidores para mezcla en línea.

Existen 4 formas de mezclar en línea los productos primario y secundario (como la gasolina y el alcohol, o el diésel y el B100) en un sistema automatizado. El capítulo 6 del MPMS las clasifica en 2 grupos:

#### A) MEZCLA SECUENCIAL (“Sequential Blending”):

La mezcla se realiza entregando los productos uno detrás de otro a la cisterna, pero asegurando que al final de la carga se alcanzará la proporción requeridas de los productos a mezclar. Este tipo de mezcla se puede realizar manualmente o a través de sistemas de medición y control.

Se tienen 2 subtipos de este tipo de mezcla:

##### a. Mezcla “Splash” (“Splash blending”):

Los productos se miden por trenes de medición diferentes y se entregan directamente a la cisterna en las cantidades necesarias para cumplir el porcentaje deseado (receta). Usualmente se entregan los productos uno a la vez. La mezcla se produce en la cisterna.

##### b. Mezcla secuencial automática (“Automatic Sequential Blending”):

Los productos se miden a través de un mismo medidor, pero se entregan a la cisterna uno detrás de otro. La mezcla final se produce en la cisterna.

#### B) MEZCLA PROPORCIONAL (“Ratio Blending”):

La mezcla se realiza en línea, tratando de mantener durante el despacho la proporcionalidad requerida en la receta (por ejemplo: 92.2% de gasolina 7.8% de alcohol), pero asegurando que al final de la carga esta proporción será alcanzada.

Se tienen 2 subtipos de este tipo de mezcla:

- a. Mezcla de flujo sin control (“Wild Stream”) o Mezcla proporcional “Off Rack”:

El producto de mayor proporción se entrega “libre” por la línea principal, mientras el flujo del producto secundario es medido y controlado antes del punto de inyección. El caudal de la mezcla es medido aguas abajo del punto de inyección ubicado antes del brazo de carga. La diferencia de caudales obtenidos da como resultado el flujo del producto libre. Con esta información el controlador del sistema ajusta la válvula del producto secundario para mantener la proporción durante la carga.

- b. Mezcla proporcional “On Rack”:

Ambos productos son medidos y controlados independientemente, mezclándose antes del brazo de carga. El sistema de control regula las válvulas en cada tren de medición para mantener la proporcionalidad.

#### **i. Comentarios respecto al tipo de mezcla a usarse.**

Debido a que la normativa local exige el uso de mezcla en línea, en Perú se utiliza la mezcla proporcional. Actualmente se pueden encontrar ambos subtipos de esta en Perú, existiendo la discusión de cuál es el más adecuado.

Existe desconocimiento sobre la reacción ocurrida en la mezcla de alcohol y gasolina. Al momento de ponerse en contacto ambos productos, la mezcla disminuye su temperatura en aproximadamente 4°C y aumenta momentáneamente su volumen en un 0.03% debido a una reacción endotérmica ocurrida a nivel molecular. Al estabilizarse la temperatura de la mezcla se obteniéndose un volumen final de 0.05% mayor a la suma de los volúmenes independientes. (FMC Technologies, 2007)

En una mezcla tipo “Wild Stream”, este fenómeno puede generar una distorsión en el cálculo del volumen de la gasolina, debido a que el caudal de esta última se obtiene por diferencia de los registros de caudal del medidor de la mezcla (afectado por la disminución de temperatura y aumento del volumen total) y el del medidor de alcohol. A largo plazo, la suma de volúmenes entregados de ambos productos diferirá del balance de almacenamiento de los tanques.

La experiencia de la empresa TechnipFMC indica que en el caso de mezcla tipo “On Rack”, el balance de almacenamiento de los productos no se verá afectado. Se debe tener en cuenta que, una vez estabilizada la mezcla, el cliente observará que cuenta con un volumen 0.05% mayor que el total de volumen facturado, calculado por la suma independiente de alcohol y gasolina.

## 4 ANÁLISIS Y CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESPACHO DE GASOHOL.

El presente capítulo analizará el proceso de despacho de gasohol con mezcla en línea, y propondrá los escenarios sobre los cuales se deberán calcular los parámetros preliminares que determinarán el diseño y configuración del sistema.

### 4.1 Velocidad límite en tuberías de Hidrocarburos.

Según las prácticas recomendadas del API RP 2003 (API, 1998), para minimizar la probabilidad de ignición por carga electrostática generada por la fricción del líquido en la tubería, la velocidad límite del hidrocarburo no debe superar 7 m/s, y deberá limitarse según la fórmula empírica:

$$v \cdot d < 0,5 \frac{m^2}{s} \text{ (ó } 64 \text{ in} \cdot \text{ft/s)}$$

Donde: “v” es la velocidad del flujo en la tubería, y “d” el diámetro interno de esta.

Adicionalmente recomienda que, al inicio de la carga, la velocidad debe ser menor o igual a 1 m/s hasta que el nivel de líquido cubra el agujero interno de la toma de entrada al tanque. Esto evita que salpicaduras puedan generar ignición dentro de la cisterna.

La tabla 3 muestra una lista de velocidades calculadas para las medidas más usadas en terminales, en tuberías de acero al carbono Schedule 40.

Tabla 5-Velocidades Límite para tuberías de 2, 3 y 4 pulg.

Diám. Nominal (pulg.)	Diámetro Interno		Velocidad de Flujo		v·d m <sup>2</sup> /s	Caudal	
	(pulg.)	(mm)	(ft/s)	(m/s)		GPM	m <sup>3</sup> /min
2	2.067	52.5	3.28	1.00	0.05	34	0.13
			22.97	7.00	0.37	240	0.91
3	3.068	77.9	3.28	1.00	0.08	76	0.29
			21.06	6.42	0.50	485	1.84
			22.97	7.00	0.55	529	2.00
4	4.026	102.3	3.28	1.00	0.10	130	0.49
			16.04	4.89	0.50	636	2.41
			22.97	7.00	0.72	911	3.45

NOTA: Elaboración propia.

#### 4.2 Caracterización del proceso de despacho gasohol en un sistema con mezcla en línea.

El proceso ideal de despacho de un producto sin mezcla, luego del encendido de la bomba, consta básicamente de 3 etapas:

- 1) Inicio. Desde la apertura de válvula hasta que se alcanza el máximo flujo.
- 2) Despacho a máximo flujo. Desde que se alcanza el máximo flujo, hasta que se inicia el cierre de la válvula.
- 3) Cierre. Desde el inicio de cierre de válvula hasta que se alcanza flujo cero y sea ha entregado el volumen preestablecido.

Para un sistema con mezcla en línea de gasohol se pueden aplicar las mismas etapas, pero por cada medidor. La mezcla en línea “ideal” debería lograr que, en todo momento, las proporciones de gasolina y alcohol después del punto de mezcla sean de 92,2% y 7,8% respectivamente.



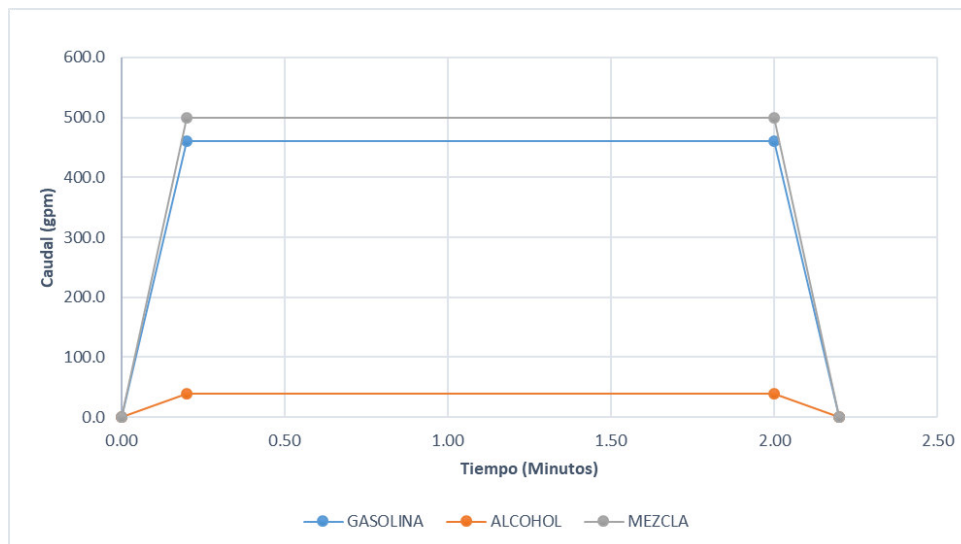


Figura 30- Caudal vs Tiempo de Despacho - 1000 galones de gasohol (ideal)

Fuente: Elaboración propia.

Esto requeriría que las válvulas de control de alcohol y gasolina se abran y cierren al mismo tiempo; y que, durante la regulación de estas hasta alcanzar sus caudales máximos se mantenga la proporción. La Figura 31 muestra un ejemplo de este caso para un despacho de 1000 galones de gasohol con un caudal máximo de mezcla de 500 gpm.

En la práctica, esta configuración no es posible ser lograda debido a varios factores. El principal, es la limitación de controlar el flujo de ambos productos de forma instantánea, considerando las variaciones de presión propias de la configuración hidráulica de un sistema de tuberías. Los otros factores son los requerimientos propios de una operación de control y las consideraciones de seguridad mencionadas en capítulos anteriores. Debajo un resumen de estos requerimientos:

- a. Velocidad de flujo menor de 1m/s en la apertura de válvulas (API, 1998) hasta que la entrada del producto dentro de la cisterna sea cubierta de líquido. La finalidad es minimizar las salpicaduras que puedan generar ignición por carga electrostática de los gases acumulados.
- b. Apertura lenta de las válvulas, hasta alcanzar el máximo caudal en cada una de ellas, usualmente en etapas o “escalones”, con la finalidad de dar tiempo a estabilizar el flujo y evitar variaciones de presión no deseadas.

- c. Apertura secuencial de las válvulas de la gasolina y el etanol al inicio de la descarga, con la finalidad de evitar variaciones de presión difíciles de controlar por el computador de flujo.
- d. Limitación del flujo máximo en ambos productos para minimizar la carga electrostática debido a la fricción del líquido y la tubería. Se debe considerar lo descrito en el API RP 2003.
- e. Cierre lento de las válvulas antes de finalizar las descargas, para evitar golpes de ariete.
- f. Cierre de la línea de alcohol antes de la finalización del despacho, permitiendo el llenado de la línea con gasolina, desde el punto de mezcla hasta la salida del brazo de carga. Debido a su comportamiento hidrofílico, es posible encontrar trazas de agua en el etanol, las cuales pueden acelerar el proceso de corrosión de las tuberías de acero (Berlanga, Biezma, & Fernández, 2011).

Estas condiciones determinan las etapas de un proceso real de despacho. Los valores correspondientes a cada punto serán obtenidos con los datos determinados por las condiciones del sistema.

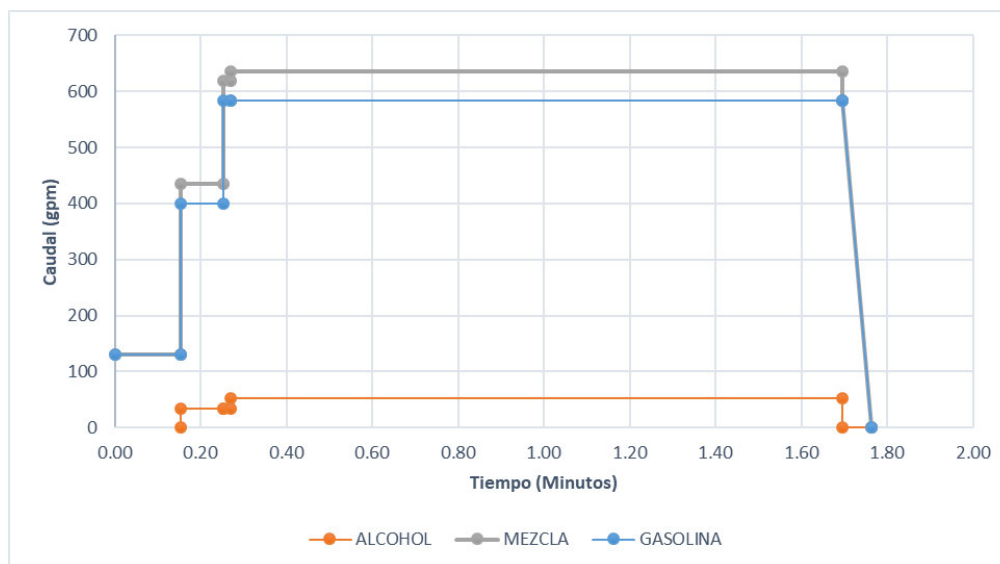


Figura 31- Caudal vs Tiempo de Despacho - 1000 galones de gasohol (real simplificado)

Fuente: Elaboración propia.

La figura 31 es un gráfico simplificado que ejemplifica el comportamiento ideal de un despacho real de 1000 galones de gasohol teniendo en cuenta los requerimientos resumidos.

Este gráfico no muestra las variaciones de flujo debido a las variaciones de presión que ocurren durante la operación. Estas variaciones se graficarían como pequeñas oscilaciones en las líneas mostradas.

Debido a que la inyección de alcohol inicia y termina dentro del despacho de la gasolina, el porcentaje de etanol respecto a la mezcla instantánea, durante la etapa de máximos caudales, estará por encima de 7.8%. La diferencia se acentúa cuando el volumen total de mezcla a despachar es menor, debido a que los volúmenes de gasolina pura, entregada al inicio y al final de la descarga, son constantes sin importar la capacidad del compartimiento.

Durante el despacho, el controlador intentará que la línea de producto principal (gasolina) trabaje a su máximo caudal posible. Debido a que los camiones cisterna tienen, por lo general, compartimientos con capacidades que van desde 500 galones a 12 000 galones, estos volúmenes a despachar definen los escenarios extremos para el caudal de alcohol durante la mezcla. Durante la etapa de máximos caudales, el mayor requerimiento de alcohol se dará con en el llenado de compartimientos de 500 galones.

#### **4.3 Consideraciones para el diseño hidráulico del sistema de despacho.**

Dado que los componentes de los sistemas de medición de hidrocarburos están bastante estandarizados, son estos elementos los que definen las condiciones iniciales para los cálculos hidráulicos.

La válvula de conexión entre el brazo de carga y el camión cisterna (válvula API) determina que la línea principal sea de 4" o menos. Con esto, la velocidad máxima de la mezcla queda limitada a 639 gpm, debido al límite superior en tuberías de 4" según el API RP 2003.

Si bien es posible utilizar medidores de la línea principal de más de 4", con la finalidad de disminuir la pérdida de carga, los costos de suministro, instalación y mantenimiento se elevan, y hacen poco razonable su uso. Adicionalmente, los fabricantes de medidores y válvulas han enfocado el diseño de sus productos para esta aplicación en diámetros nominales de 4" y menores.

La consideración principal respecto a la operación es la relacionada al tiempo de carga de cada cisterna. Menor tiempo de carga se traduce en mayor cantidad de ventas. Esto, por lo general, define que la línea principal debe ser la máxima posible. Consideraciones de los inversionistas sobre el costo total del sistema de despacho (suministro, operación y

mantenimiento) puede inclinar la decisión del dimensionamiento a menores caudales de operación.

Debido a que los tanques de almacenamiento están dentro del área de la Terminal, las presiones de operación requeridas para el transporte de líquidos, desde los tanques al punto de despacho, están por debajo de 150 psi, por lo que el uso del estándar ANSI 150 para el equipamiento es suficiente. Cabe indicar que, para productos presurizados como el GLP, el estándar requiere el uso de ANSI 300 o mayor.

Para el cálculo de pérdidas se deberá contar con información respecto a la distribución de los puntos de despachos en la planta, recorrido de líneas, nivel máximo y mínimo de los tanques de almacenamiento de gasolina y etanol; así como los diámetros de las tomas de estos tanques.

En resumen, los datos iniciales para el diseño hidráulico del sistema de despacho de gasohol, serán:

- a. La receta de la mezcla final será de 7.8% de alcohol y 92.2% de gasolina.
- b. Caudal máximo de mezcla de 639 gpm.
- c. Línea principal de 4”.
- d. El sistema de mezcla a utilizar será del tipo “Ratio Blending, On Rack”.
- e. Compartimentos de cisternas mínimo de 500 galones y máximo de 12 000 galones.
- f. Esquema de distribución de puntos de despacho tanques.
- g. Cota de nivel de producto mínimo y máximo de tanques.
- h. Cota de nivel de producto mínimo y máximo de camión cisterna.
- i. Tipo de medidores a usar.

Con estos datos se calcularán los parámetros básicos para el diseño del sistema:

- a. Caudales máximos de alcohol y gasolina durante la etapa de máximo caudal, considerando 2 escenarios:
  - Escenario 1: cisterna de 500 galones. Este determina el máximo caudal requerido de la línea de alcohol durante el proceso de mezcla.

- Escenario 2: cisterna de 12 000 galones. Este determinará el máximo caudal de la línea de gasolina durante el proceso de mezcla.
- b. Pérdida de carga para el máximo caudal de operación determinado, de la línea de Gasolina para definición de la presión de la bomba a utilizar. Se deberá considerar el mínimo nivel de gasolina en el tanque y máximo en la cisterna.
- c. Presión máxima en el punto de mezcla debido al flujo de gasolina máximo de operación, la cual definirá la presión que debe vencer la línea de etanol en el escenario más exigente.
- d. Pérdida de carga para el máximo caudal de operación de la línea de alcohol para definición de bomba, de modo que permita vencer la presión en el punto de inyección.

#### **4.4 Consideraciones para la configuración del sistema de despacho.**

Para el correcto funcionamiento del sistema se deben determinar los valores de los parámetros que deberán ser parte de la configuración del sistema de despacho y que definen el proceso de mezcla. Según lo expuesto en los párrafos anteriores, los valores para calcular son:

- a. Receta.
- b. Caudal límite de apertura, correspondiente a una velocidad de 1 m/s de la línea de gasolina.
- c. Volumen inicial que asegure se cubra la toma de entrada interna a la cisterna.
- d. Caudal máximo de la mezcla, correspondiente a lo indicado en el API RP 2003.
- e. Caudal máximo de gasolina.
- f. Caudal máximo de alcohol.
- g. Momento de apertura de la válvula de alcohol, después del inicio de la apertura de la válvula de gasolina.
- h. Volumen a considerar para dejar la línea limpia de etanol entre el punto de mezcla y la válvula API del brazo de carga.

## **5 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS BÁSICOS DESTINADOS AL DISEÑO DEL SISTEMA DE DESPACHO Y SU CONFIGURACIÓN**

El presente capítulo es la aplicación práctica de lo propuesto en el capítulo 4, para la obtención de los parámetros básicos destinados al diseño hidráulico del sistema de despacho y su configuración.

En los cálculos de los parámetros de diseño se considerarán los escenarios extremos del sistema, según lo detallado en el capítulo anterior. Se calcularán las pérdidas de los trenes de medición basándose en información de fabricantes cuando sea posible. En el caso de los datos relacionados los camiones cisterna se asumirán valores estimados.

Para los parámetros de configuración del sistema, se propone un procedimiento de cálculo que considera los descrito en el capítulo anterior.

El ejemplo intenta aclarar el criterio que se debe seguir en el cálculo para sistemas de mayor complejidad, los cuales requerirían software especializado de cálculo hidráulico. Es por esta razón que se toma un modelo simplificado del sistema considerando bombas dedicadas por producto en cada isla, tuberías rectas, tanques al mismo nivel de los trenes de medición, bombas y cisterna, de modo que se destaque el procedimiento más que el cálculo en sí.

### **5.1 Descripción del sistema de despacho de aplicación y requerimiento.**

Para la aplicación consideraremos un Terminal con un sistema automatizado existente de carga de camiones de gasolina de 90 octanos, el cual se debe adaptar para la comercialización de gasohol. La línea existente de gasolina desde el tanque a la isla, así como los componentes del tren de medición, son de 4", con una presión de trabajo máxima de 150 psi. Las tuberías utilizadas son Schedule 40. El medidor existente es del tipo desplazamiento positivo y aún se encuentra operativo. La bomba actual es de 300 gpm y se desea cambiar por una que permita mayor fluidez en el llenado de camiones.

Se deben determinar:

- El caudal de despacho de gasohol.
- La presión y el caudal que se requerirá en la nueva bomba de gasolina.

- El diámetro del tren de etanol, así como la presión y el caudal que se requerirá en la nueva bomba de gasolina.
- La lista de parámetros a configurar en el sistema de mezcla.

Los componentes del tren de medición actual son:

- Filtro tipo canasta de 4" #150, Mesh 40 Modelo: In-Line-Strainer de FMC Technologies.
- Medidor de Desplazamiento de 4" #150, Modelo Prime4 de FMC Technologies.
- Válvula electrohidráulica de 4" #150, Modelo 210, de FMC Technologies.

El nivel máximo de gasohol en las cisternas que cargan en la terminal, medido desde el nivel de la pista es de 3,00 m. La toma API se encuentra a 0,60 m del nivel de la pista.

Los accesorios y las dimensiones de los componentes de la isla existente se muestran en la siguiente figura.

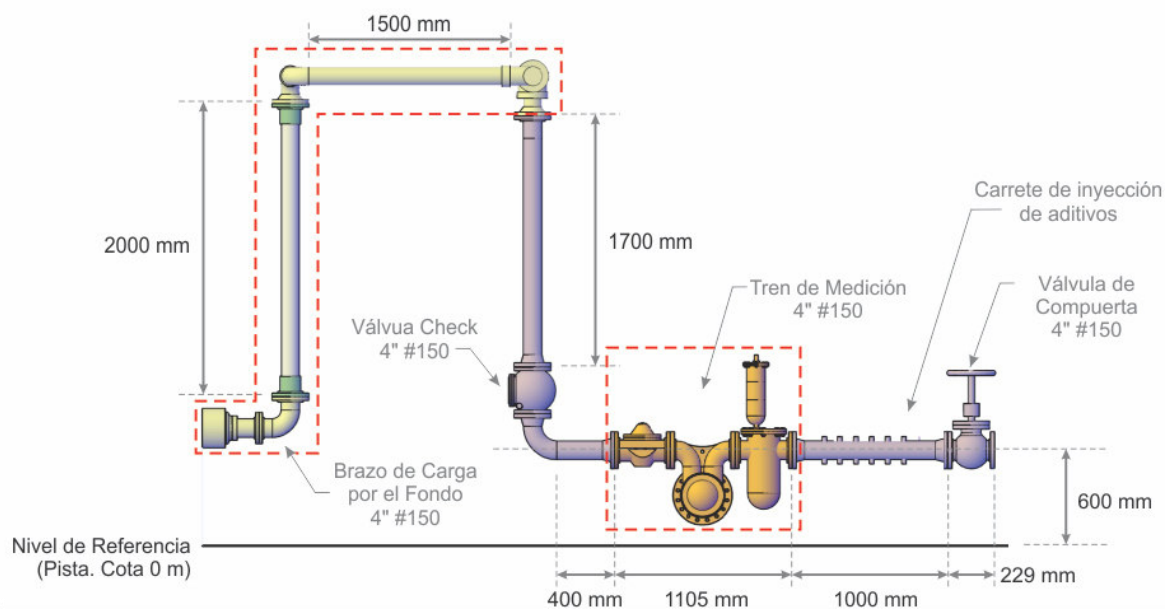


Figura 32 - Componentes del brazo de carga de Gasolina existente.

Fuente: Elaboración propia.

Para el almacenaje de etanol se ha adaptado un tanque existente. Los datos de nivel de producto de los tanques, medidos desde el nivel de referencia son:

Tabla 6 - Datos relevantes de los tanques existentes.

	Gasolina	Etanol
Nivel de la toma, al eje.	0.60 m	0.60 m
Diámetro de la toma	4"	4"
Nivel Bajo de producto	1 m	1 m
Nivel Alto de producto	12 m	10 m

## 5.2 Propuesta para el nuevo tren de etanol.

Se propone tender una línea de etanol desde el tanque existente al punto de inyección, el cual ubicamos en el niple antes del codo, aguas abajo del tren de medición de 4". En la siguiente figura, sobre un esquema de la planta, se muestran en rojo los trabajos que se proponen realizar para adecuar el sistema.

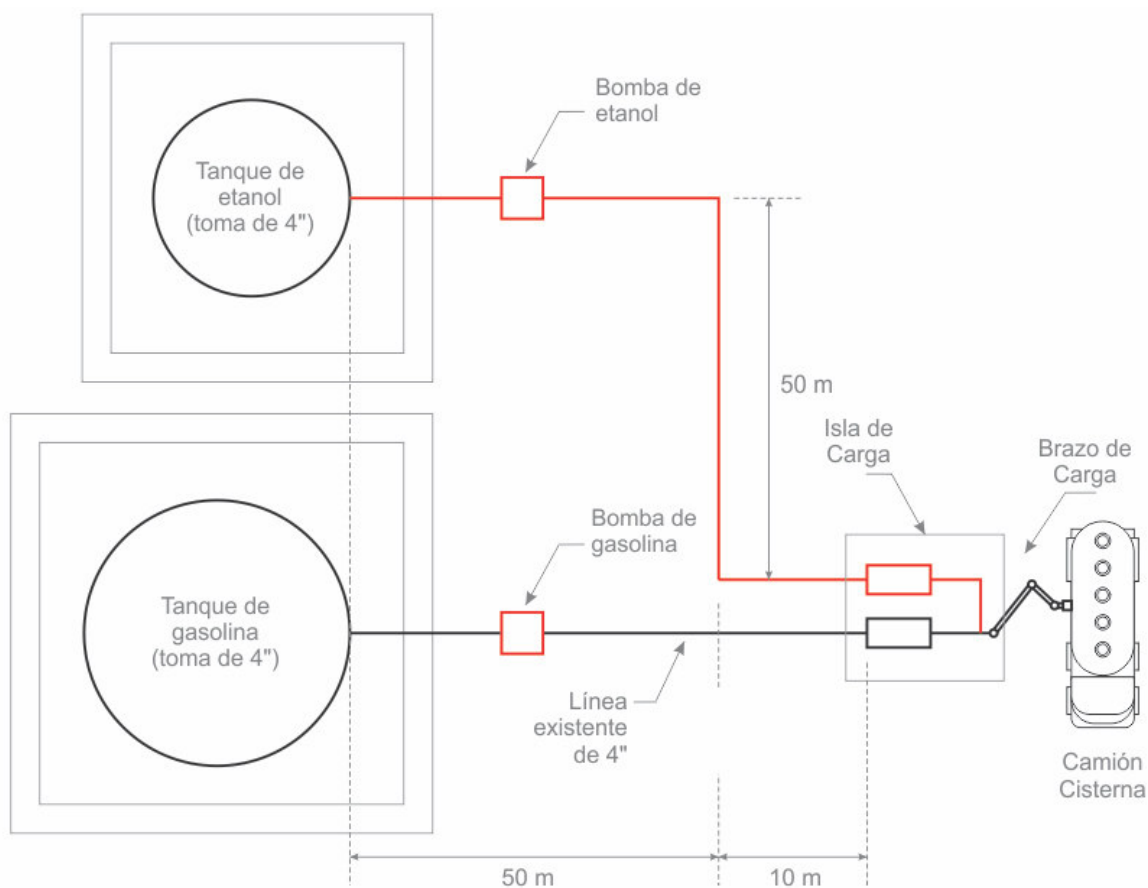


Figura 33 - Esquema general del sistema de mezcla de ejemplo.

Fuente: Elaboración propia.

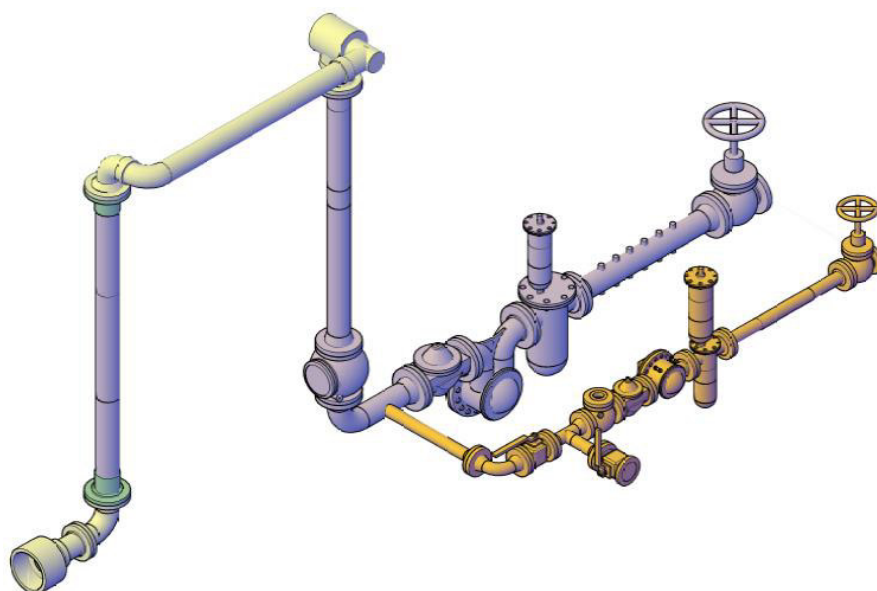


Para la medición del etanol se plantea utilizar el un medidor del tipo desplazamiento positivo. Se preselecciona el Modelo Genesis de 3" o 2" de FMC Technologies. Se preselecciona la válvula y el filtro de la misma marca y modelo que las existentes, pero en 2" o 3".

Para realizar calibraciones del medidor de etanol, se considera colocar una derivación posterior al tren de medición con un juego de válvulas esféricas de paso completo. Esto obliga a colocar la válvula check entre el tren de medición y la derivación para la calibración.

La brida de la válvula de compuerta para el ingreso de etanol a la isla se dejará alineada con la brida de la válvula de entrada de la línea de gasolina. Para tener espacio suficiente para el mantenimiento de los equipos, se considera una distancia horizontal entre ejes de ambas líneas, de 1,00 m.

El esquema muestra la ubicación propuesta del tren de etanol (en anaranjado) con relación al tren de medición de gasolina (en morado).



*Figura 34 - Distribución de tren de etanol respecto al tren de medición de gasolina.*

*Fuente: Elaboración propia.*

### **5.3 Determinación de los flujos máximos durante el llenado de cisterna.**

Dado que la línea después del punto de medición es de 4" Sch40, para cumplir con lo indicado por el API RP 2003, se debe cumplir que:

- La suma del caudal de gasolina y de etanol, debe ser menor a 636 gpm.
- El caudal máximo inicial debe ser de 130 gpm .

Además, sabemos que el porcentaje de cada componente en la mezcla final debe ser de: 92,2% de gasolina y 7,8% de etanol.

Dado que la longitud de tubería después del punto de mezcla es mayor a 5,6 metros, el volumen a desplazar para dejar esta porción de la línea con gasolina, asumiendo que el diámetro interno de esta sección será equivalente al de una tubería de 4" Sch40, debe ser de:

$$V = A_t \times L_{tub}$$

Donde V es el volumen encerrado en la tubería,  $A_t$  es el área transversal interior de la tubería, y  $L_{tub}$  la longitud desde el punto de mezcla.

$$\begin{aligned} &= \left( \frac{\pi}{4} \cdot (D_i)^2 \right) (L_{tub}) \\ &= \left( \frac{\pi}{4} \cdot (4,026 \text{ pulg} \times 0,0254 \frac{m}{\text{pulg}})^2 \right) (5,6 \text{ m}) \\ &= 0,04599312 m^3 \times \left( 264,172 \frac{\text{galones}}{m^3} \right) = \mathbf{12,15 \text{ galones}} \end{aligned}$$

Sabemos que el 7.8% de la mezcla es de etanol, con un caudal máximo de mezcla de 636 gpm, por lo que se requerirá, bajo este porcentaje, un caudal estimado referencial de etanol de:

$$(636 \text{ gpm}) \times (7.8\%) = \mathbf{49.4 \text{ gpm}}$$

Dado que el medidor Genesis de 3" tiene un rango de medición de hasta de 500 gpm, y el de 2" hasta de 150 gpm, es suficiente utilizar el medidor de 2" para este caso. Se define entonces que el tren de medición de etanol será de 2".

Se asumen los siguientes datos:

- Para la gasolina:
  - Volumen inicial (primer escalón de flujo) a 1 m/s: 40 galones a 130 gpm.
  - Volumen de segundo escalón de flujo: 40 galones a 300 gpm.
  - Volumen para limpiar la línea de gasolina: 20 galones (mayor a 12,15 galones).
- Para el alcohol:
  - Volumen inicial (primer escalón de flujo) a 1 m/s: 5 galones a 34 gpm.
  - Caudal máximo posible: 240 gpm.

### 5.3.1 Escenario de máximo requerimiento de etanol.

Para el escenario donde se tiene el mayor requerimiento de etanol (compartimento de 500 galones), calculamos los caudales requeridos usando el concepto de la gráfica simplificada de Caudal vs Tiempo de despacho, propuesta anteriormente.

Sabemos que, para este caso de 500 galones de mezcla, se requiere:

$$500 \text{ galones} \times 98,2\% = 461 \text{ galones de gasolina}$$

$$500 \text{ galones} \times 7,8\% = 39 \text{ galones de etanol}$$

Del gráfico Caudal vs Tiempo para la gasolina, obtenemos las siguientes relaciones:

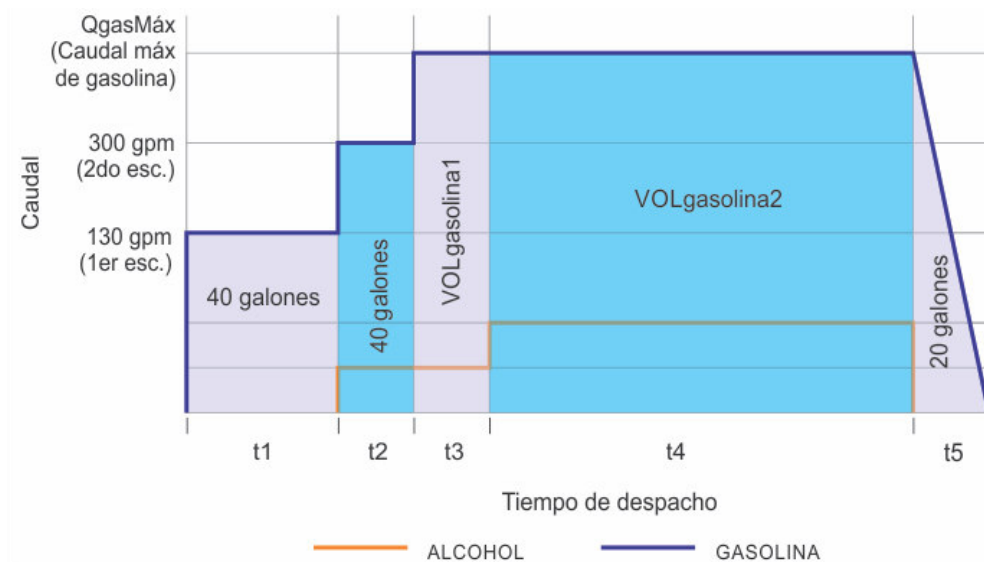


Figura 35 - Esquema de Caudal vs Tiempo para la gasolina

Fuente: Elaboración propia.

$$t_1 = \frac{40 \text{ galones}}{130 \text{ gpm}} = 0,3077 \text{ minutos}$$

$$t_2 = \frac{40 \text{ galones}}{300 \text{ gpm}} = 0,1333 \text{ minutos}$$

$$t_3 = \frac{VOL_{gasolina1}}{Q_{gasMáx}} \dots (\text{ecuación 1})$$

$$t_4 = \frac{VOL_{gasolina2}}{Q_{gasMáx}} \dots (\text{ecuación 2})$$

$$20 \text{ galones} = \frac{1}{2} \times Q_{gasM\acute{a}x} \times t_5 \rightarrow t_5 = \frac{40 \text{ galones}}{Q_{gasM\acute{a}x}} \dots (\text{ecuaci3n 3})$$

Sabiendo que el total de gasolina a entregar será de 461 galones tenemos:

$$461 = 40 + 40 + VOL_{gasolina1} + VOL_{gasolina2} + 20$$

$$361 = VOL_{gasolina1} + VOL_{gasolina2} \dots (\text{ecuaci3n 4})$$

Del rea a caudal máximo de gasolina tenemos:

$$Q_{gasM\acute{a}x} = \frac{361 \text{ galones}}{t_3 + t_4} \dots (\text{ecuaci3n 5})$$

Del gráfico Caudal vs Tiempo para el etanol, obtenemos las siguientes relaciones:

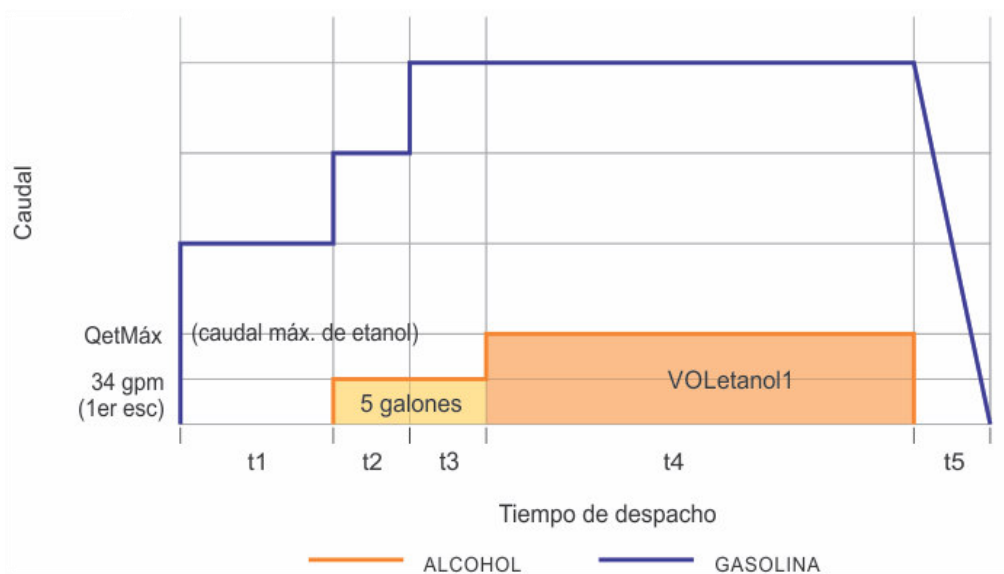


Figura 36- Esquema de Caudal vs Tiempo para el etanol.

Fuente: Elaboraci3n propia.

$$(t_2) + t_3 = \frac{5 \text{ galones}}{34 \text{ gpm}} = (0,1333 \text{ minutos}) + t_3 \rightarrow t_3 = \mathbf{0,0137 \text{ minutos}}$$

$$Q_{etM\acute{a}x} = \frac{VOL_{etanol1}}{t_4} \dots (\text{ecuaci3n 6})$$

Sabemos que el total de etanol será de 39 galones, entonces:

$$VOL_{etanol1} = (39 - 5) \text{ galones} = \mathbf{34 \text{ galones}}$$

De la ecuaci3n 6, obtenemos:

$$Q_{etM\acute{a}x} = \frac{34 \text{ galones}}{t_4}$$

$$Q_{etM\acute{a}x} \cdot t_4 = 34 \text{ galones ... (ecuaci3n 7)}$$

Y sabemos que la suma de caudales máximos debe ser el máximo para la mezcla.

$$636 \text{ gpm} = Q_{gasM\acute{a}x} + Q_{etM\acute{a}x}$$

$$Q_{etM\acute{a}x} = 636 \text{ gpm} - Q_{gasM\acute{a}x} \text{ ... (ecuaci3n 8)}$$

Entonces, de la ecuaci3n 8, en la ecuaci3n 7, tenemos:

$$(636 \text{ galones} - Q_{gasM\acute{a}x}) \cdot t_4 = 34 \text{ galones ... (ecuaci3n 9)}$$

De la ecuaci3n 5 en la ecuaci3n 7, y el valor de  $t_3$ , tenemos:

$$\left[ 636 \text{ galones} - \frac{361 \text{ galones}}{0,0137 \text{ min} + t_4} \right] \cdot t_4 = 34 \text{ galones}$$

Despejando  $t_4$ , obtenemos una ecuaci3n cuadrática de la siguiente forma:

$$a \cdot t_4^2 + b \cdot t_4 + c = 0$$

Donde:

$$a = 636 \text{ gpm}$$

$$b = 636 \text{ gpm} \cdot 0,0137 \text{ min} - 361 \text{ galones} - 34 \text{ galones} = -386,2868 \text{ galones}$$

$$c = (-1) \cdot 34 \text{ galones} \cdot 0,0137 \text{ min} = -0,4658 \text{ galones} \cdot \text{min}$$

Aplicando la ecuaci3n general para cuadráticas:

$$t_4 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$t_{4,1} = 0,6086 \text{ min.}$$

$$t_{4,2} = -0,0012 \text{ min.}$$

Descartando el resultado negativo, tenemos que  $t_4 = 0,6086$  minutos.

De la ecuaci3n 7 obtenemos el caudal máximo de etanol para este escenario:

$$Q_{etM\acute{a}x} \cdot (0,6086 \text{ min.}) = 34 \text{ galones}$$

$$Q_{etM\acute{a}x} = 55.87 \text{ gpm}$$

De la ecuaci3n 8 obtenemos el caudal máximo de gasolina para este escenario:

$$(55.87 \text{ gpm}) = 636 \text{ gpm} - Q_{gasM\acute{a}x} \dots (\text{ecuaci3n 8})$$

$$Q_{gasM\acute{a}x} = 580,13 \text{ gpm}$$

Para completar los tiempos de despacho, obtenemos  $t_5$  de la ecuaci3n 3:

$$t_5 = \frac{40 \text{ galones}}{580,13 \text{ gpm}} = 0,0689 \text{ min}$$

Por lo que el tiempo total de despacho para un compartimento de 500 galones ( $t_{Tot500}$ ), sera:

$$t_{Tot500} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$$

$$t_{Tot500} = 0,3077 + 0,1333 + 0,0137 + 0,6086 + 0,0689 = 1,1323 \text{ min}$$

$$t_{Tot500} \cong 1 \text{ minuto } 8 \text{ segundos}$$

En resumen, del cálculo para este escenario, tenemos:

Tabla 7 - Caudales máximos para despacho de 500 galones de gasohol.

Para un compartimento de 500 galones de gasohol	
Caudal máximo de gasolina	580,13 gpm
Caudal máximo de etanol	55,87 gpm
Caudal máximo de mezcla	636,00 gpm
% de etanol en mezcla, a caudales máx.	8.78%
Tiempo estimado total de despacho	1 min. 8 s.

### 5.3.2 Escenario de máximo requerimiento de gasolina.

Para el escenario donde el requerimiento de caudal de gasolina sera máximo, aplicamos el mismo procedimiento anterior, pero considerando un volumen total de despacho de 12 000 galones.

Se obtiene:

Tabla 8 - Caudales máximos para despacho de 12 000 galones de gasohol.

Para un compartimento de 12 000 galones de gasohol	
Caudal máximo de gasolina	586,19 gpm
Caudal máximo de etanol	49,81 gpm
Caudal máximo de mezcla	636,00 gpm
% de etanol en mezcla, a caudales máx.	7.83%
Tiempo estimado total de despacho	19 min. 12 s.

### 5.3.3 Determinación del máximo caudal de gasolina a configurarse en el controlador.

Si se configura como máximo caudal de gasolina el caudal obtenido en el escenario del compartimento de 12 000 galones (586,19 gpm); cuando se despache un compartimento de 500 galones, no se podrá obtener el caudal de etanol requerido para terminar el despacho de forma adecuada (55,86 gpm), debido a que se superará el caudal de seguridad máximo de la mezcla (636 gpm).

Los caudales máximos por configurar en el controlador son los mínimos que se deben obtener con la válvula de control completamente abierta. La presión de la bomba seleccionada para el sistema debe asegurar como mínimo esta condición. Si esta superase el requerimiento de presión, el controlador ordenará a la válvula restringir el caudal hasta que alcance el valor configurado.

Debido a esto, el caudal máximo de gasolina a configurar deberá ser 580,13 gpm, y el de etanol 55,86 gpm. Con estos valores, nos aseguramos que la válvula de control de alcohol pueda restringir el flujo y encontrar un caudal que permita un proceso de mezcla adecuado.

Usando el procedimiento de cálculo anterior para el despacho en 12 000 galones, limitando el caudal de gasolina a 580,13 gpm ( $Q_{\text{gasMáx}} = 580,13 \text{ gpm}$ ), obtenemos un tiempo de despacho de 19,409 min (19 min. 25 s), solo 13 segundos más que el escenario calculado. Esto indica que limitar el caudal de gasolina a 580,13 gpm, prácticamente no afecta la eficiencia del despacho. El caudal requerido de alcohol para este 3er escenario es de 49,3 gpm.

## 5.4 Cálculos previos al análisis hidráulico.

### 5.4.1 Propiedades de los productos de la mezcla.

Para los cálculos siguientes usaremos los valores más altos de densidad y viscosidad con los que contamos. Estos se indican en la tabla del Capítulo 2.

Dado que no se cuenta con los valores de densidad y viscosidad de la mezcla, usaremos el promedio ponderado de la gasolina y el alcohol en las proporciones de la receta.

Para facilitar los cálculos, usaremos las unidades en kg-m-s.

Tabla 9 - Propiedades de los productos a usar en el cálculo.

	Gasolina	Etanol	Mezcla	Unidad
<b>Proporción</b>	92,2	7,8	100	%
<b>Densidad</b>	745	797	749,1	kg/m <sup>3</sup>
<b>Visc. Cinemática (ν)</b>	0,7	1,4		cSt
	7x10 <sup>-7</sup>	14 x10 <sup>-7</sup>		m <sup>2</sup> /s
<b>Visc. Dinámica (μ)</b>	5,215x10 <sup>-4</sup>	11,158 x10 <sup>-4</sup>	5,68 x10 <sup>-4</sup>	kg/m.s

#### 5.4.2 Factores de fricción en tuberías

Dado que conocemos los caudales y dimensiones de las tuberías, calcularemos los factores de fricción “f”.

Para la tubería de 4” Sch40, donde el diámetro interno es de 4,026 pulgadas, calculamos el diámetro interno  $D$  en metros, y luego el área efectiva, en m<sup>2</sup>:

$$D = 4.026 \text{ pulg} \cdot \left( \frac{0.0254 \text{ m}}{1 \text{ pulg}} \right) = 0,1023 \text{ m}$$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2$$

$$A_{4''} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,1023 \text{ m})^2 = 0,0080315 \text{ m}^2$$

Para un caudal de 636 gpm de mezcla, calculamos la velocidad del flujo:

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V_{4''} = \frac{636 \text{ gpm} \cdot \left( \frac{1 \text{ m}^3/\text{s}}{15850.3 \text{ gpm}} \right)}{0,0080315 \text{ m}^2} = 4,8856 \text{ m/s}$$

Verificando el régimen con el Número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$



$$Re = \frac{749,1 \text{ kg/m}^3 \cdot 4,8856 \text{ m/s} \cdot 0,1023 \text{ m}}{0,000568 \text{ kg/m.s}} = 658\,891 \text{ (Turbulento)}$$

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,046 \text{ mm} \cdot \left(\frac{10^{-3} \text{ m}}{1 \text{ mm}}\right)}{0,1023 \text{ m}} = 4,5 \times 10^{-4}$$

Dado que es régimen turbulento donde el número de Reynolds se encuentra entre 5000 y  $10^8$ , y el valor de  $\epsilon/D$  se encuentra entre  $10^{-6}$  y  $10^{-2}$ , aplicamos

$$f = \frac{1,325}{\left[\ln\left(\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,47}{Re^{0,9}}\right)\right]^2}$$

$$f_{\text{gasohol 4"}} = \frac{1,325}{\left[\ln\left(\frac{4,5 \times 10^{-4}}{3,7 \cdot (0,1023 \text{ m})} + \frac{5,47}{(658\,891)^{0,9}}\right)\right]^2} = 0,0172$$

Aplicando el mismo procedimiento para las diferentes combinaciones de tubería y diámetro, con los caudales calculados anteriormente, tenemos:

Tabla 10 – Cálculo del Factor de Fricción para las tuberías.

PRODUCTO	Gasohol	Gasolina	Etanol	
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	749,1	745	797	797
Visc. Dinámica (kg/m.s)	0,000568	0,0005215	0,0011158	0,0011158
Caudal (gpm)	636	580,13	55,87	55,87
Caudal (m/s)	0,04013	0,03660	0,00352	0,00352
Diámetro Nominal (pulg)	4	4	4	2
Diám. Interno (pulg)	4,026	4,026	4,026	2,067
Diám. Interno (m)	0,1023	0,1023	0,1023	0,0525
Área Transversal (m <sup>2</sup> )	8,21x10 <sup>-3</sup>	8,21x10 <sup>-3</sup>	8,21x10 <sup>-3</sup>	2,16x10 <sup>-3</sup>
Velocidad (m/s)	4,8856	4,4564	0,4292	1,6282
ε (mm)	0,0460	0,0460	0,0460	0,0460
ε / D	4,50x10 <sup>-4</sup>	4,50x10 <sup>-4</sup>	4,50x10 <sup>-4</sup>	8,76x10 <sup>-4</sup>
Núm. de Reynolds	658891	651017	31348	61059
Función Explícita de f	cumple	cumple	cumple	cumple
f	0,0172	0,0172	0,0242	0,0230

### 5.4.3 Pérdida de presión debido a los trenes de medición.

Debido a que se conocen los valores de caudal máximos en la línea de gasolina y alcohol, podemos estimar la de caída de presión para cada componente de los trenes de medición, directamente de la información técnica del fabricante (ver anexos).

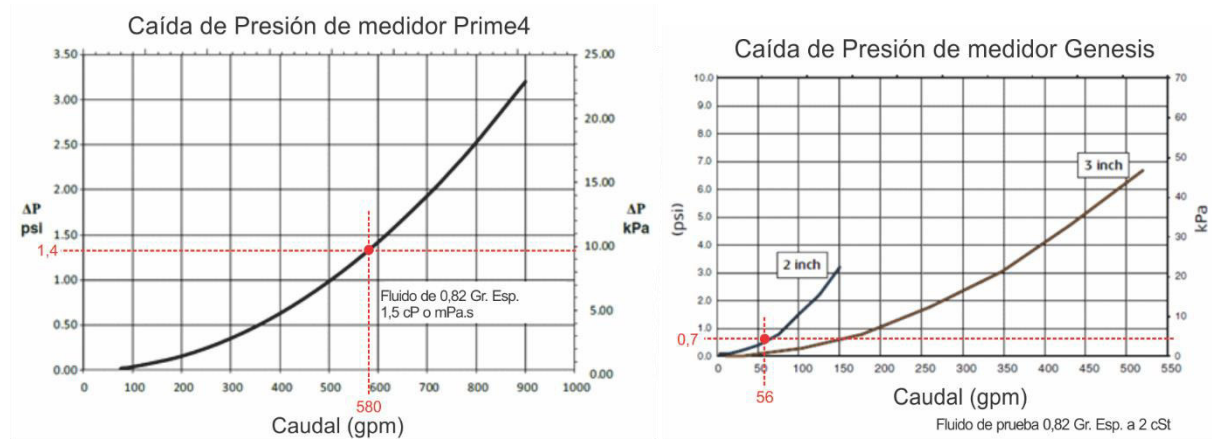


Figura 37- Caída de presión de medidor de 4", modelo Prime; y medidor de 2", modelo Genesis.

Fuente: Especificaciones Técnicas Prime 4 y Génesis (TechnipFMC, 2019)

Para el filtro, se considera apertura de malla correspondiente a Mesh 40.

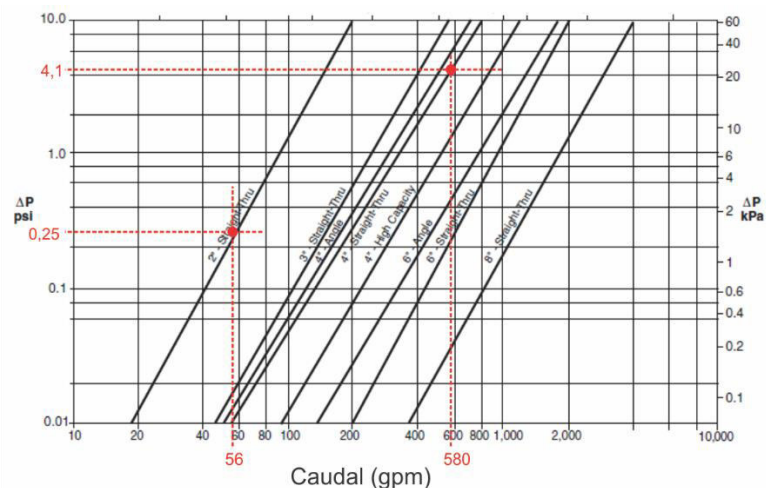


Figura 38-Cáida de Presión para filtro mesh40, modelo In-Line

Fuente: Especificaciones Técnicas Smith Meter In-Line Strainer (FMC Technologies, 2013)

Para el caso de la válvula de control, la pérdida de presión indicada en la información técnica es la correspondiente a la apertura total de la válvula.

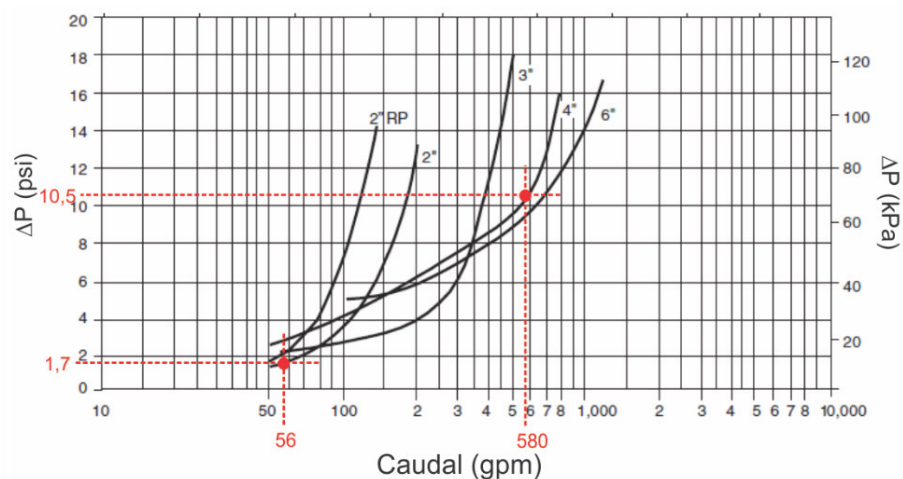


Figura 39-Caída de Presión para Válvula de Control, modelo 210

Fuente: Especificaciones Técnicas Válvula 210 (TechnipFMC, 2017)

Con esta información armamos el cuadro de caídas de presión del tren de medición, mostrado en la Tabla 11.

Tabla 11-Cuadro de Pérdidas de Presión para los trenes de medición.

Línea de 4" - Gasolina		
Q = 580,13 gpm	Caída de Presión	
	(psi)	(kPa)
Filtro (Mesh 40)	4,1	28
Medidor (Prime4)	1,4	9,6
Válv. de Control	10,5	72
<b><math>\Delta P_{\text{tren 4"}}</math></b>	<b>16,0</b>	<b>109,6</b>
Línea de 2" - Etanol		
Q = 55,87 gpm	Caída de Presión	
	(psi)	(kPa)
Filtro (Mesh 40)	0,25	1,7
Medidor (Genesis 2")	0,7	4,8
Válv. de Control	1,7	11,7
<b><math>\Delta P_{\text{tren 2"}}</math></b>	<b>2,65</b>	<b>18,2</b>

NOTA: Elaboración propia.

Los caudales seleccionados se convierten en los máximos caudales para cada producto.

## 5.5 Análisis hidráulico.

### 5.5.1 Presión en el punto de Mezcla.

Dado que el caudal de la mezcla hacia la cisterna ya está definido, podemos calcular la presión manométrica en el Punto de Mezcla ( $P_M$ ), considerando la altura en la cisterna y la

pérdida de carga por los componentes después del punto de mezcla. Calcularemos 2 valores de presión: 1) Mínima, cuando la cisterna está vacía ( $P_{M\text{mín}}$ ); y 2) Máxima, cuando la cisterna está al máximo de nivel ( $P_{M\text{máx}}$ ).

Para el cálculo de la pérdida en el brazo de carga de 4", dado que no existe información respecto a la pérdida de carga en función al caudal en la información técnica proporcionada por los proveedores, calcularemos la pérdida haciendo un paralelo con accesorios conocidos. Consideraremos que cada junta giratoria superior se comportará como 2 codos de 90°, y que la junta giratoria inferior, antes de la válvula API, se comportará como un codo de 90°. La válvula API será considerada como una válvula check completamente abierta.

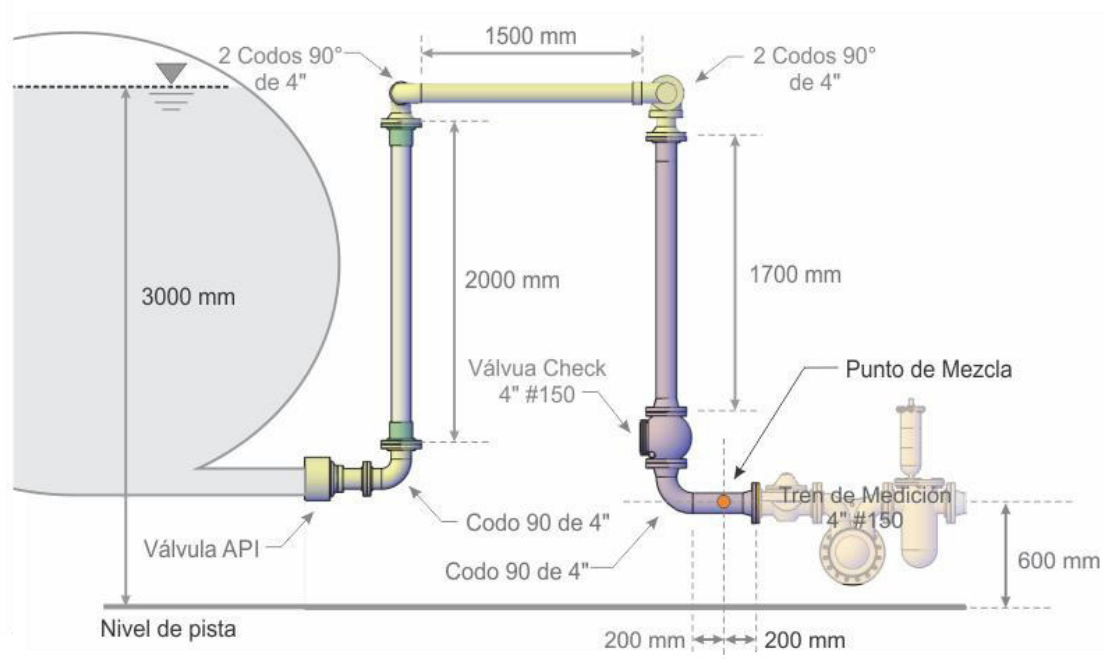


Figura 40- Punto de mezcla y brazo de carga.

Fuente: Elaboración propia.

Para todos los cálculos, el nivel de referencia será a 0,60 m del nivel de pista. Las presiones serán manométricas, por lo que la presión medida al ambiente será de “0”

La ecuación de energía entre el punto de mezcla y el nivel del líquido en la cisterna sería:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho_2 g} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \sum \text{Pérdidas}$$

$$\frac{P_M}{\rho_{gasohol}g} + 0 + \frac{(7 \text{ m/s})^2}{2g} = \frac{0}{\rho_{gasohol}g} + H_{cisterna} + \frac{0^2}{2g} + \sum \text{Pérdidas}$$

$$\frac{P_M}{\rho_{gasohol}g} (\rho_{gasohol}g) = (\rho_{gasohol}g) \left[ H_{cisterna} - \frac{(7 \text{ m/s})^2}{2g} + \sum \text{Pérdidas} \right]$$

Despejando la Presión en el punto de Mezcla:

$$P_M = (\rho_{gasohol}g) \left[ H_{cisterna} - \frac{(7 \text{ m/s})^2}{2g} + \sum \text{Pérdidas} \right] \dots (2.1)$$

Calculando la sumatoria de pérdidas de: 6 Codos, (2,0+1,5+1,7+0,2) metros de tuberías y 2 Válvulas Check.

$$\sum \text{Pérdidas} = \frac{V_2^2}{2g} \left[ 6 \cdot K_{codo \ 90} + 2 \cdot K_{check} + f_{gasohol} \left( \frac{L_{tuberías}}{D_{tuberías}} \right) \right]$$

$$\sum \text{Pérdidas} = \frac{(4,8856 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)} \left[ 6 \cdot 0,9 + 2 \cdot 2,5 + (0,0172) \left( \frac{5,4 \text{ m}}{0,1023 \text{ m}} \right) \right]$$

$$\sum \text{Pérdidas} = (1.2166 \text{ m}) [11.3079] = \mathbf{13.757 \text{ m}}$$

La ecuación 2.1, quedaría:

$$P_M = \left( 749,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \right) \left[ H_{cisterna} - \frac{49 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} + 13,757 \text{ m} \right]$$

$$P_M = \left( 7348,67 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2} \right) [H_{cisterna} - 2,497 \text{ m} + 13,757 \text{ m}]$$

$$P_M = \left( 7348,67 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2} \right) [H_{cisterna} + 11,260 \text{ m}] \dots (2.2)$$

De la ecuación 2.2, obtenemos los valores máximo y mínimo de  $P_M$ . Convertimos las presiones en “psi” para referencia, debido a que en el rubro se utiliza esta unidad para la presión. (1 Pa = 0,000145038 psi).

$$P_{M \text{ máx}} = \left( 7348,67 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2} \right) [(3 - 0,6) \text{ m} + 11,260 \text{ m}] = \mathbf{100 \ 382, \ 83 \ Pa = 15, \ 199 \ psi}$$

$$P_{M \text{ mín}} = \left( 7348,67 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2} \right) [0 \text{ m} + 11,260 \text{ m}] = \mathbf{82 \ 746, \ 02 \ Pa = 12, \ 001 \ psi}$$

### 5.5.2 Determinación de la presión de bomba requerida para la línea de gasolina.

Si consideramos la ecuación de energía para un punto en la superficie del líquido en el tanque y el punto de mezcla, sumando la presión debido a la bomba, tenemos:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_{bomba}}{\rho_1 g} = \frac{P_2}{\rho_2 g} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \sum \text{Pérdidas}$$

$$H_{TkGasolina} + \frac{P_{bomba}}{\rho_{gasolina} g} = \frac{P_M}{\rho_{gasolina} g} + \frac{(4,4564 \text{ m/s})^2}{2g} + \sum \text{Pérdidas} \dots (2.3)$$

La caída de presión está compuesta de: 1) aguas arriba de la válvula de compuerta en la isla tenemos la entrada (recta) del tanque a la tubería y 60 m de tubería de 4"; 2) en la isla tenemos la válvula de compuerta 4" #150, el carrito para inyección de aditivo de 1 m de longitud, el tren de medición y un niple de 0,20 m hasta el punto de inyección.

$$\sum \text{Pérdidas} = \frac{V_{gasolina}^2}{2g} \left[ 1 \cdot K_{entrada} + 1 \cdot K_{compuerta} + f_{gasolina} 4" \left( \frac{\sum L_{tuberías}}{D_{tuberías}} \right) \right]$$

$$+ \frac{(\text{Pérdida de Presión en Tren 4"})}{\rho_{gasolina} \cdot g}$$

$$\sum \text{Pérdidas} = \frac{(4,4564 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)} \left[ 1 \cdot (0,5) + 1 \cdot (0,19) \right]$$

$$+ \left( 0,0172 \cdot \left( \frac{60 \text{ m} + 1 \text{ m} + 0,2 \text{ m}}{0,1023 \text{ m}} \right) \right) \left] + \frac{(109,6 \cdot 10^3 \text{ Pa})}{(745 \text{ kg/m}^3)(9,81 \text{ m/s}^2)}$$

$$\sum \text{Pérdidas} = (1,0121 \text{ m}) \cdot [10,9797] + (14,996 \text{ m}) = \mathbf{26,109 \text{ m}}$$

Reemplazando el valor en la ecuación 2.3:

$$H_{TkGasolina} + \frac{P_{bomba}}{(745 \text{ kg/m}^3)(9,81 \text{ m/s}^2)}$$

$$= \frac{P_M}{(745 \text{ kg/m}^3)(9,81 \text{ m/s}^2)} + \frac{(4,4564 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)} + 26,109 \text{ m}$$

$$H_{TkGasolina} + \frac{P_{bomba}}{(7308,45 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^2)} = \frac{P_M}{(7308,45 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^2)} + 27,1212 \text{ m} \dots (2.4)$$

Como vemos en la ecuación 2.4 la  $P_{bomba}$  es máxima, cuando la altura del tanque de gasolina ( $H_{tkGasolina}$ ) es mínima, y la presión en el punto de mezcla es máximo ( $P_M$  máx). Calculamos la Presión requerida de la bomba ( $P_{BombaGas}$ )

$$(1\text{ m} - 0,6\text{ m}) + \frac{P_{MáxBomba}}{(7308,45\text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^2)} = \frac{(100\ 382,83\text{ Pa})}{(7308,45\text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^2)} + 27,1212\text{ m}$$

$$\frac{P_{BombaGas}}{(7308,45\text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^2)} = 13,7352\text{ m} + 27,1212\text{ m} - (0,4\text{ m})$$

$$P_{BombaGas} = (40,4564\text{ m}) \cdot \left(7308,45 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot \text{s}^2\right) = 295\ 673\text{ Pa} = 42,83\text{ psi}$$

Se requerirá una bomba que pueda entregar un caudal de gasolina de 580,13 gpm a 42,83 psi.

### 5.5.3 Determinación de la presión de bomba requerida para la línea de etanol.

Si consideramos la ecuación de energía para un punto en la superficie del líquido en el tanque de etanol y el punto de mezcla, sumando la presión debido a la bomba, tenemos:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_{bomba}}{\rho_1 g} = \frac{P_2}{\rho_2 g} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \sum \text{Pérdidas}$$

$$H_{TKEtanol} + \frac{P_{bomba}}{\rho_{etanol} g} = \frac{P_M}{\rho_{etanol} g} + \frac{(1,6282\text{ m/s})^2}{2g} + \sum \text{Pérdidas} \dots (2.8)$$

Las medidas y los accesorios del tren de medición de etanol (anaranjado) se muestran en la siguiente figura. La línea de alimentación desde el tanque es de 4" hasta la entrada a la isla donde, mediante una reducción, se brida con la válvula de compuerta de 2" #150. La válvula esférica indicada es del tipo paso completo, por lo que el aporte de la pérdida de carga de esta se puede considerar nula.

La caída de presión está compuesta de: 1) aguas arriba de la reducción tenemos la entrada (recta) del tanque a la tubería y 110 m de tubería de 4", 2 codos de 90°; 2) desde la reducción a 2" tenemos la válvula de compuerta 2" #150, 1 tramo recto de 2,534 m el tren de medición, la válvula check de 2", 1 codo de 90°, y 1 tramo recto de 1 m hasta el punto de inyección.

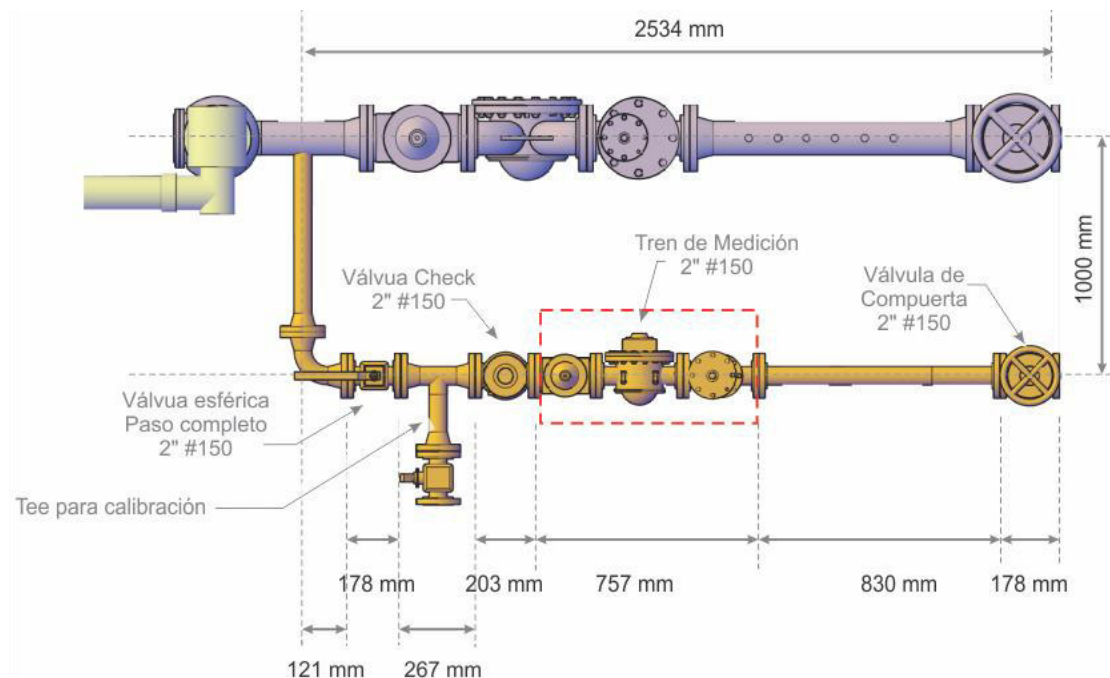


Figura 41 - Medidas y accesorios tren de etanol.

Fuente: Elaboración propia.

Con esta información calculamos las pérdidas de carga desde el tanque hasta el punto de inyección.

$$\begin{aligned}
 \sum \text{Pérdidas} &= \frac{V_{\text{etanol } 4''}^2}{2g} \left[ 1 \cdot K_{\text{entrada}} + 2 \cdot K_{\text{codo}} + f_{\text{etanol } 4''} \left( \frac{\sum L_{\text{tuberías de } 4''}}{D_{\text{tubería } 4''}} \right) \right] \\
 &+ h_{f(\text{reducción})} \\
 &+ \frac{V_{\text{etanol } 2''}^2}{2g} \left[ 1 \cdot K_{\text{check}} + 1 \cdot K_{\text{compuerta}} + 1 \cdot K_{\text{codo}} + 1 \cdot K_{\text{te } 90^\circ} \right. \\
 &\left. + f_{\text{etanol } 2''} \left( \frac{\sum L_{\text{tuberías } 2''}}{D_{\text{tubería } 2''}} \right) \right] + \frac{(\text{Pérdida de Presión en Tren } 2'')}{\rho_{\text{etanol}} \cdot g} \\
 \sum \text{Pérdidas} &= \frac{(0,4292 \text{ m/s})^2}{2 (9,81 \text{ m/s}^2)} \left[ 1 \cdot (0,5) + 2 \cdot (0,9) + (0,0242) \cdot \left( \frac{50 + 50 + 10 \text{ m}}{0,1023 \text{ m}} \right) \right] \\
 &+ 1,1 \left[ \frac{(1,6282 \text{ m/s} - 0,4292 \text{ m/s})^2}{2 (9,81 \text{ m/s}^2)} \right] \\
 &+ \frac{(1,6282 \text{ m/s})^2}{2 (9,81 \text{ m/s}^2)} \left[ 1 \cdot (2,5) + 1 \cdot (0,19) + 1 \cdot (0,9) + 1 \cdot (1,8) + (0,0230) \right. \\
 &\left. \cdot \left( \frac{2,534 + 1 \text{ m}}{0,0525 \text{ m}} \right) \right] + \frac{(18,2 \text{ kPa})}{(797 \text{ kg/m}^3) \cdot (9,81 \text{ m/s}^2)}
 \end{aligned}$$



$$\sum \text{Pérdidas} = (0,0094 \text{ m})[2,3 + (0,0242) \cdot (1075,27)] + (0,0806 \text{ m}) \\ + (0,1351 \text{ m})[5,39 + (0,0230) \cdot (67,31)] + (2,327 \text{ m})$$

$$\sum \text{Pérdidas} = (0,2578 \text{ m}) + (0,0806 \text{ m}) + (0,6942 \text{ m}) + (2,327 \text{ m}) = \mathbf{3,616 \text{ m}}$$

Resolviendo la ecuación 2.8, reemplazando el valor de las pérdidas calculadas, la presión máxima en el punto de mezcla, y el menor valor de la altura del tanque, obtendremos la presión requerida de la bomba de etanol ( $P_{\text{BombaEtanol}}$ )

$$(1 - 0,6 \text{ m}) + \frac{P_{\text{BombaEtanol}}}{\left(797 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = \frac{(100\,382,83 \text{ Pa})}{\left(797 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} + \frac{\left(1,6282 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot (9,81)} + 3,616 \text{ m}$$

$$\frac{P_{\text{BombaEtanol}}}{\left(7818,57 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2}\right)} = 12,839 \text{ m} + 0,0830 \text{ m} + 3,616 \text{ m} - (0,4 \text{ m})$$

$$P_{\text{BombaEtanol}} = \left(7818,57 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2}\right) (16,138 \text{ m}) = \mathbf{126\,176 \text{ Pa} = 18,30 \text{ psi}}$$

Se requerirá una bomba que pueda entregar un caudal de etanol de 55,87 gpm a 18,30 psi.

## 5.6 Valores para configurar el sistema de despacho.

Del análisis y cálculos realizados podemos listar los valores de configuración obtenidos para el sistema propuesto de mezcla en línea de gasohol. Estos determinan el proceso de mezcla, y servirán de base para el diseño hidráulico del sistema.

- a. Receta: 92.2% de Gasolina, 7.8% de etanol.
- b. Caudal límite de apertura de la línea de gasolina: 130 gpm.
- c. Volumen inicial que asegure se cubra la toma de entrada interna a la cisterna: 40 gpm.
- d. Caudal máximo de la mezcla: 636 gpm.
- e. Caudal máximo de gasolina: 580,13 gpm.
- f. Caudal máximo de alcohol: 55,87 gpm.

- g. Momento de apertura de la válvula de alcohol, después del inicio de la apertura de la válvula de gasolina: Al terminar el primer escalón de la gasolina.
- h. Volumen a considerar para dejar la línea del producto principal limpia de etanol entre el punto de mezcla y la válvula API del brazo de carga: 20 galones.

## 6 CONCLUSIONES

### OBJETIVO ESPECÍFICO 1.

*Explicar el concepto de transferencia de custodia aplicada a las transacciones de hidrocarburos líquidos, basados en la normativa nacional e internacional, y la literatura existente al respecto.*

El concepto de “Transferencia de Custodia” engloba todos los procedimientos que garantizan que el proceso de medición y cálculo de las características y cantidades del bien, sean transparentes para ambas partes de la transacción.

Debido a que los instrumentos de medida mecánicos o electrónicos poseen errores intrínsecos o sufren desviaciones en el tiempo, o por uso; sumado a que factores externos puedan alterar la medición; ambas partes de la transacción deben asegurar que las diferencias entre lo declarado y lo entregado sean mínimas, y se encuentren dentro de un rango tolerable.

En la Transferencia de Custodia de combustibles líquidos, debe asegurarse que los sistemas de medición de propiedades y cantidades del producto sean: precisos, estables en el tiempo, calibrables, ajustables; y que sus procedimientos de cálculo y registro de información no puedan ser alterados para posteriores fiscalizaciones.

Las principales normativas nacionales que se deben considerar localmente para el diseño de un sistema de despacho de hidrocarburos líquidos en una terminal mayorista son los decretos supremos D.S. 91-2009-EM, D.S. 043-2007-EM, D.S. N° 045-2001-EM y modificación con D.S. N°045-2005; y la ley N° 26221 – Ley orgánica de hidrocarburos. De las internacionales, los documentos emitidos por el API, el “Manual of Petroleum Measurement Standards”; y las recomendaciones RP 2003 y RP 500.

### OBJETIVO ESPECÍFICO 2.

*Describir y Analizar los componentes de un sistema de medición de hidrocarburos líquidos con mezcla en línea, y los conceptos más importantes relacionados.*

Como se describió y analizó en el Capítulo 3, los componentes básicos del sistema de medición para mezcla en línea de gasolina y etanol para la producción de gasohol son: el tren

de medición compuesto del medidor de alta precisión, la válvula de control, el medidor de temperatura y el computador de flujo que recibe la información de los sensores y controla la válvula. Adicionalmente, debido a la reglamentación nacional e internacional, se debe agregar monitores de sobrellenado de cisterna y de verificación de puesta a tierra y brazos de carga por el fondo, así como un sistema de recuperación de vapores.

El arreglo más adecuado para un sistema de preparación de gasohol en línea, debido a las variaciones de temperatura y volumen que ocurren instantáneamente en la mezcla de gasolina y etanol, es aquel que mida independientemente ambos productos para evitar que las variaciones mencionadas generen errores en la medición y en el cálculo de los inventarios. Este arreglo se conoce como “Ratio Blending, On rack”.

### **OBJETIVO ESPECÍFICO 3.**

*Proponer un procedimiento de obtención de los parámetros básicos destinados al diseño hidráulico de un sistema eficiente de despacho de gasohol con mezcla en línea.*

Para la determinación de los parámetros de diseño hidráulico preliminar de un sistema de transferencia de custodia con mezcla en línea de gasohol, conociendo la proporción de mezcla, se propone el siguiente procedimiento:

1) Calcular las velocidades límite permitidas según el diámetro de tubería, y velocidad máximo inicial para evitar ignición por chispa, según lo recomendado por el API. Considerar las tuberías estándar a usar (tuberías de 2”, 3” y 4” #150). Calcular los caudales correspondientes.

2) Calcular el volumen de producto puro (gasolina) que quedará empacado entre la conexión al camión cisterna y la válvula de control de flujo, para ser usado en la configuración del sistema de control, de requerirse.

3) Caracterizar el proceso de mezcla en línea, reconociendo de forma genérica los momentos de apertura, control y cierre de las válvulas y los caudales máximos permitidos según cada etapa, por cada producto.

4) Recopilar información del fabricante respecto a la pérdida de carga generada por los componentes del tren de medición.

5) Recopilar la información para el cálculo de pérdidas (cotas, pérdidas de tuberías y accesorios, niveles máximos y mínimos de tanques).

6) Calcular los valores de caudal máximo de ambos productos en los escenarios extremos (capacidad máxima y mínima de cisternas):

- Escenario 1: cisterna de 500 galones, para determinar el máximo caudal requerido de la línea de alcohol durante el proceso de mezcla.
- Escenario 2: cisterna de 12 000 galones, para determinar el máximo caudal de la línea de gasolina durante el proceso de mezcla.

7) Calcular la pérdida de carga para el máximo caudal de operación de la línea de Gasolina, para determinar la presión de bomba requerida. Se deberá considerar el mínimo nivel de gasolina en el tanque y máximo en la cisterna.

8) Calcular la presión máxima en el punto de mezcla debido al flujo de gasolina máximo de operación, la cual definirá la presión que debe vencer la línea de etanol en el escenario más exigente.

9) Calcular la pérdida de carga para el máximo caudal de operación de la línea de alcohol para definición de bomba, de modo que permita vencer la presión en el punto de inyección.

Los parámetros que se deben considerar en la configuración del sistema de control de mezcla en línea de gasohol, son aquellos que limitan los caudales de modo que el despacho sea seguro, pero que maximicen la frecuencia de cargas de cisternas en la terminal. Estos son básicamente los caudales máximos permitidos de gasolina y etanol, y de la mezcla. Adicionalmente, se deben ingresar aquellos parámetros que se utilizaron en el cálculo de estos caudales, como son: los porcentajes de mezcla de cada producto, el caudal de inicio del despacho y el volumen que haga seguro el ingreso inicial de producto en la cisterna, el punto de inicio de inyección del etanol, y el volumen que permite dejar limpio de etanol el tramo después del punto del punto de inyección.

#### **OBJETIVO ESPECÍFICO 4.**

*Demostrar, mediante un ejemplo aplicativo de cálculo, que es posible aplicar el procedimiento propuesto.*

Utilizando un ejemplo de aplicación, en el capítulo 5 hemos demostrado que es posible determinar caudales adecuados de gasolina y etanol en un sistema de mezcla línea y definir las bombas a utilizar, maximizando el tiempo de despacho, sin descuidar los temas relacionados a la seguridad.

En el ejemplo se caracterizó el proceso de despacho con gráficas, ayudando a visualizar los tiempos de cada etapa y relacionándolos con los caudales y volúmenes conocidos, para poder plantear las ecuaciones que resuelvan el sistema.

Para el ejemplo se obtuvieron los siguientes resultados:

- Caudal límite de apertura de la línea de gasolina: 130 gpm.
- Caudal máximo de la mezcla: 636 gpm.
- Caudal máximo de gasolina: 580,13 gpm.
- Caudal máximo de alcohol: 55,87 gpm.
- Volumen a considerar para dejar la línea limpia de etanol entre el punto de mezcla y la válvula API del brazo de carga: 20 galones.
- Cabeza mínima requerida para la bomba de etanol: 18,3 psi.
- Cabeza mínima requerida para la bomba de gasolina: 42,83 psi.
- Tiempo de despacho estimado: Para cisterna de 5 000 galones, 1 min. 8 s; para cisternas de 12 000 galones, 19 min. 12 seg.

## 7 RECOMENDACIONES

1. Dada la constante innovación en las diferentes ramas de la ingeniería, se debe revisar continuamente las publicaciones de la normativa nacional e internacional respecto a los sistemas de instrumentación para la medición de fluidos para la Transferencia de Custodia, y sus procesos.
2. La información respecto al cambio de volumen en el proceso de mezcla en línea de gasolinas y alcohol se basa en estudios realizados por la empresa FMC Technologies en Estados Unidos, con alcohol producido localmente. Para un mejor conocimiento del comportamiento de esta mezcla, es recomendable que las universidades peruanas realicen los estudios correspondientes con el alcohol usado para combustibles.
3. Para el uso del procedimiento propuesto descrito en el Capítulo 5, se recomienda una revisión de este usando puntos de vista diferentes de los escenarios extremos considerados en este trabajo, contextualizados en la aplicación a analizar.
4. Se invita a los estudiantes y profesionales de la E.A.P. de Ingeniería Mecánica de Fluidos a seguir investigando respecto a la medición de flujo especializada para transferencia de custodia. La exactitud requerida, depende de varios factores que pueden ser estudiados desde todas las áreas de la carrera: desde el diseño mecánico, hasta la simulación de las interacciones de los equipos con los fluidos, pasando por los análisis básicos de laboratorio.

## 8 REFERENCIAS

- About API.* (s.f.). Obtenido de Sitio web del American Petroleum Institute: [www.api.org](http://www.api.org)
- API. (1985). MPMS Cap. 13.1 Statistical Concepts and Procedures in Measurement. En *Manual of Petroleum Measurement Standards*. Washington.
- API. (1994). MPMS Cap. 1 - Vocabulary. En *Manual of Petroleum Measurement Standards*. Washington.
- API. (1995). MPMS Cap. 7.2 - Dynamic Temperature Determination. En *Manual of Petroleum Measurement Standards*. Washington.
- API. (1998). *RP 2003 - Protection Against Ignitions Arising Out of Static, Lightning, and Stray Currents*. Washington.
- API. (2002). MPMS Cap. 5.6 Measurement of Liquid Hydrocarbons by Coriolis Meters. En *Manual of Petroleum Measurement Standards*. Washington.
- API. (2004). MPMS Cap. 6.2 - Loading Rack Metering Systems. En *Manual of Petroleum Measurement Standards*. Washington.
- API. (2005). MPMS Cap 5.3 - Measurement of Liquid Hydrocarbons by Turbine Meters. Washington.
- API. (2005). MPMS Cap. 5.1 General Considerations for Measurement by Meters. En *Manual of Petroleum Measurement Standards*. Washington.
- Berlanga, Biezma, & Fernández. (2011). Revisión y estado del arte de la corrosividad del etanol y sus mezclas. *Revista de Metalurgia* 47 (6), 507-518. doi:10.3989/revmetalmadrid.1016
- Brodie International. (s.f.). *Custody Transfer*. Obtenido de <https://www.brodieintl.com/custody-transfer/>
- Brodie International. (s.f.). *Positive Displacement (PD) Flow Meters / Birotor*. Obtenido de <https://www.brodieintl.com/product/birotor/>
- FMC Technologies. (2005). *A Comparison of Liquid Petroleum Meters for Custody Transfer Measurement*. Houston.



- FMC Technologies. (2007). *Renewable Fuels Blending Solutions*. Boletín Técnico.
- FMC Technologies. (2013). *Smith Meter® Strainers 2"-8" In-Line Series Specifications*.  
Obtenido de <http://info.smithmeter.com/literature/docs/ss03039.pdf>
- ICONTEC. (2004). *Guía sobre la incertidumbre de la medición para principiantes*. Bogotá:  
ICONTEC.
- Lind, D., Marchal, W., & Wathen, S. (2012). *Estadística aplicada a los negocios y la economía*.  
México D.F.: McGraw-Hill.
- OIML. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos básicos y generales, y  
términos asociados (VIM) (3ra ed.)*. (INACAL, Trad.)
- Osinermin. (2015). *La industria de los hidrocarburos líquidos en el Perú: 20 años de aporte  
al desarrollo del país*. (J. Tamayo, J. Salvador, A. Vásquez, & R. y De la Cruz, Edits.)  
Lima, Perú.
- Spurk, J. H., & Aksel, N. (2008). *Fluid Mechanics (2da ed.)*. Springer-Verlag Berlin  
Heidelberg.
- Streeter, V., Wylie, B., & Bedford, K. (2000). *Mecánica de Fluidos - 9na Edición*. Bogotá:  
McGraw-Hill.
- TechnipFMC. (2017). *Model 210 Digital Electro-Hydraulic Set-Stop*. Obtenido de  
<http://info.smithmeter.com/literature/docs/ss03009.pdf>
- TechnipFMC. (2017). *Smith Meter® AccuLoad® IV*. Obtenido de  
<http://info.smithmeter.com/literature/docs/ss06200.pdf>
- TechnipFMC. (2017). *Strainer, 2, 3, and 4-inch, E Type*. Obtenido de  
<http://info.smithmeter.com/literature/docs/ss03041.pdf>
- TechnipFMC. (2019). *PRIME 4*. Obtenido de  
<http://info.smithmeter.com/literature/docs/ss01096.pdf>
- TechnipFMC. (2020). *Genesis™ Series 2" and 3" Steel Meters*. Boletín Técnico. Obtenido de  
<http://info.smithmeter.com/literature/docs/ss01060.pdf>
- Upp, E. L. (1993). *Fluid Flow Measurement*. Houston: Gulf Publishing Company.

## 9 ANEXOS

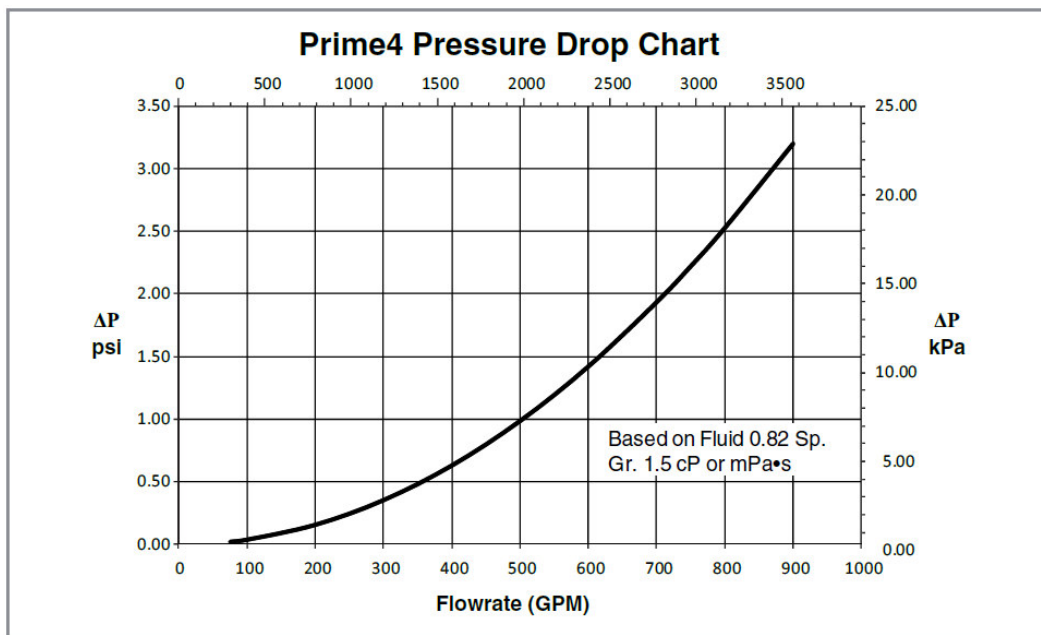
### A. Información de TechnipFMC por los componentes del Tren de medición.

Información obtenida de las especificaciones técnicas del equipamiento de TechnipFMC (antes FMC Technologies). Información pública.

#### A.1. Medidor Modelo Prime4 - Bulletin SS01096 Issue/Rev. 1.8 (11/14)

##### Flow Range

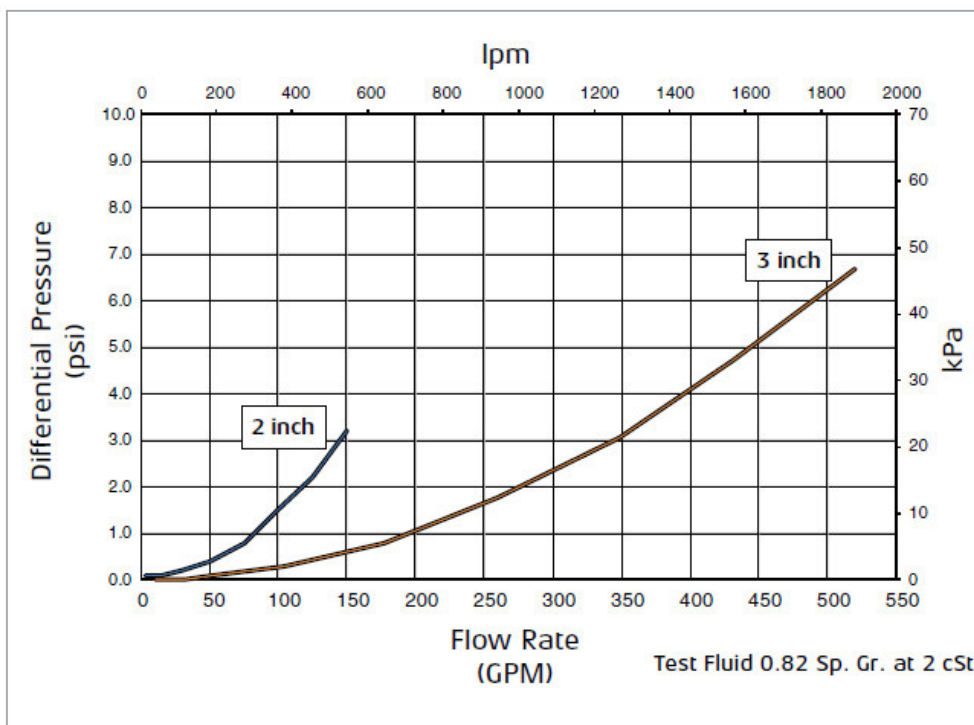
Units	Extended Min.	Normal Flow Range		Extended Max.
		Min.	Max.	
GPM	45	75	750	900
L/min	190	285	2,850	3,400



**A.2. Medidor Modelo Genesis - Bulletin SS01060 Issue/Rev. 1.0 (2/17)**

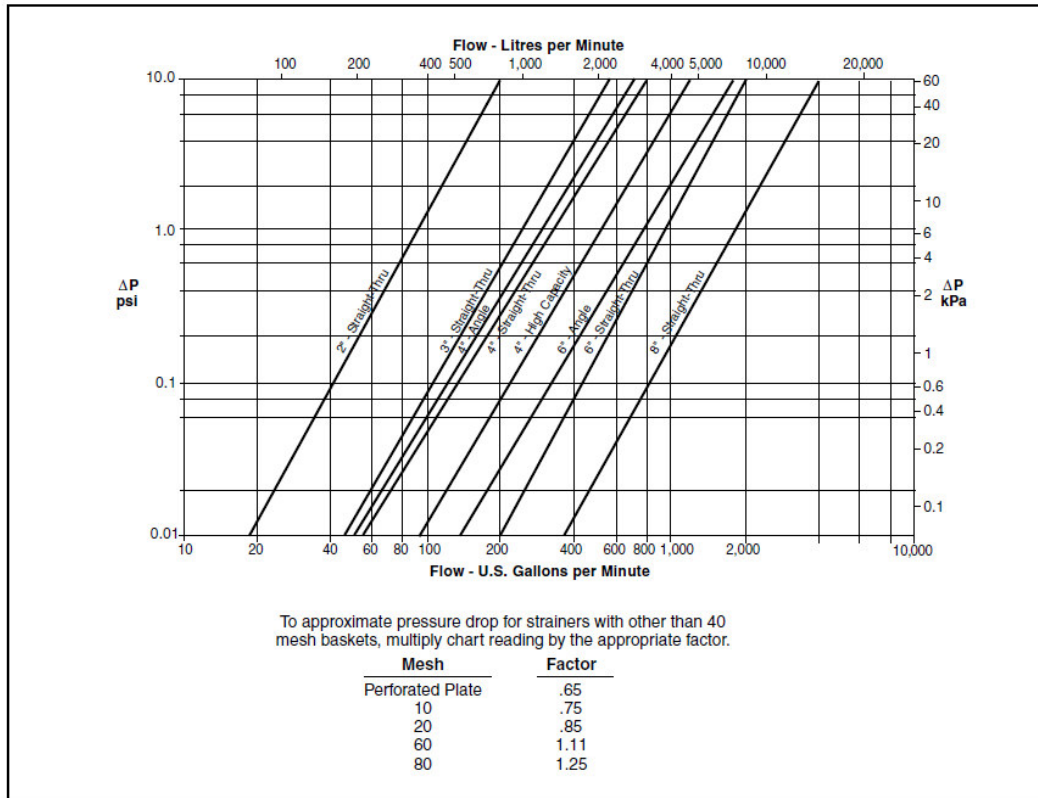
**Typical Performance**

Size	Linearity	Repeatability	Flow Range (min-max)	Ratio	Viscosity Range (cSt) <sup>2</sup>
2"	+/- 0.075%	+/- 0.01%	10-150 gpm 38-570 lpm 14-214 bph	15:1	1 – .7 to 3 2 – 3.1 to 6 3 – 6.1 to 10 4 – 10.1 to 20
	+/- 0.15%	+/- 0.02%	3-150 gpm 11-570 lpm 4-214 bph	50:1	
3"	+/- 0.075%	+/- 0.01%	33-500 gpm 127-1,900 lpm 48-714 bph	15:1	1 – .7 to 3 2 – 3.1 to 6 3 – 6.1 to 10 4 – 10.1 to 20
	+/- 0.15%	+/- 0.02%	10-500 gpm 38-1,900 lpm 14-714 bph	50:1	

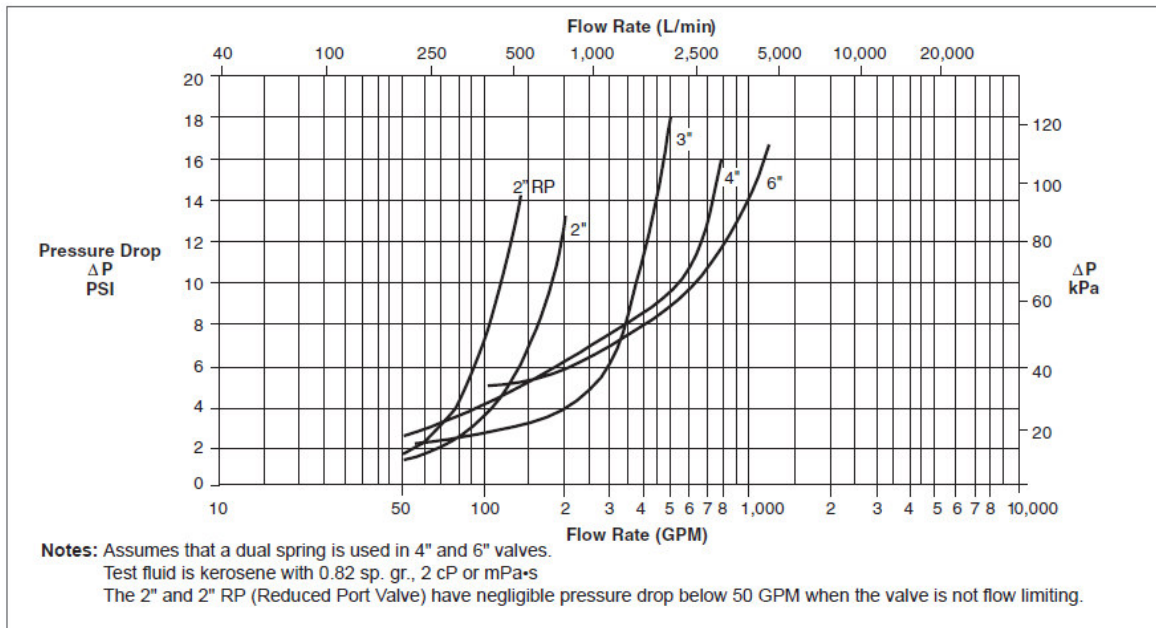


**A.3. Strainer In-Line – Bulletin SS03039**

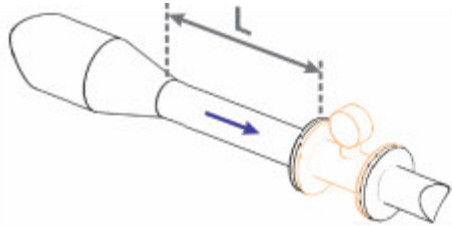
**Pressure Drop with 40 Mesh Liner**



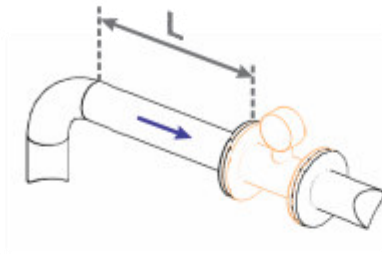
**A.4. Válvula Modelo 210 – Bulletin SS03009 Issue/Rev. 1.1 (10/17)**



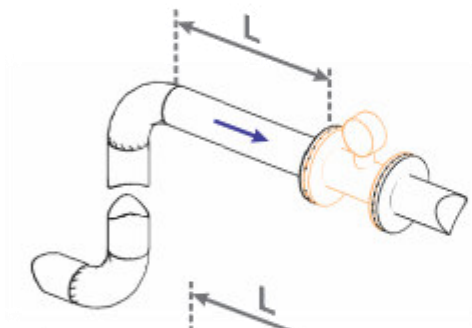
**B. Configuraciones de tubería antes de un medidor Turbina (MPMS 5.3 – Apéndice A)**



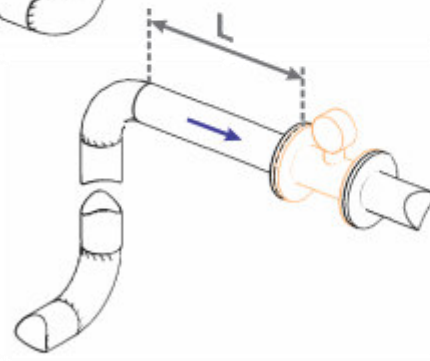
**Configuración A-1**  
Tubería de medidor con  
reducción.  
 $K_s = 0,75$



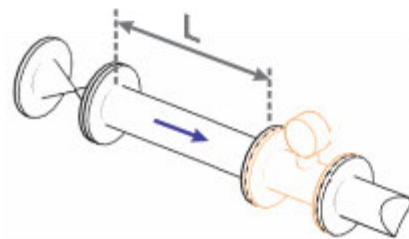
**Configuración A-2**  
Tubería de medidor con  
codo.  
 $K_s = 1,00$



**Configuración A-3**  
Tubería de medidor con  
doble codo en el mismo  
plano.  
 $K_s = 1,25$



**Configuración A-4**  
Tubería de medidor con  
doble codo en planos  
distintos.  
 $K_s = \text{desconocido}$



**Configuración A-5**  
Tubería de medidor con  
válvula  
 $K_s = 2,5$