

**PROPUESTA DE SISTEMA DE MONITOREO DE LA CORROSIÓN  
POR PÉRDIDA DE PESO**

**JUAN JOSÉ MORENO MARTÍNEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETROLEOS  
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DEL GAS  
BUCARAMANGA**

**2012**

**PROPUESTA DE SISTEMA DE MONITOREO DE LA CORROSIÓN  
POR PÉRDIDA DE PESO**

**JUAN JOSÉ MORENO MARTÍNEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:  
Especialista en Ingeniería del Gas**

**Director**

**Prof. M.Sc. JOHN FABER ARCHILA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETROLEOS  
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DEL GAS  
BUCARAMANGA**

**2012**

## DEDICATORIA

*A DIOS fuente inagotable de fe, amor y humildad con la cual he conseguido todos mis propósitos. A mis padres Juan y Teresa a quienes con su amor, comprensión y apoyo hicieron que todas aquellas metas que me había trazado fueran posibles. A mis hermanos y compañeros de trabajo por su apoyo incondicional gracias.*

*Juan José*

## **AGRADECIMIENTOS**

*El autor expresa sus agradecimientos a:*

*La Universidad Industrial de Santander por permitir nuestra formación profesional.*

*La Escuela de Ingeniería de petróleo y a todos sus docentes de la especialización en ingeniería del gas por permitirnos ser parte de su gran familia y darnos una formación integral.*

*Al profesor JOHN FABER ARCHILA por su dirección y colaboración en este proyecto.*

*Juan José.*

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	19
1.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2 ESPECÍFICOS	19
2. MARCO TEORICO	20
2.1 CORROSIÓN	20
2.2 TIPOS DE CORROSIÓN	23
2.2.1 Corrosión uniforme	23
2.2.2 Corrosión galvánica de dos metales	25
2.2.3 Corrosión por hendiduras	25
2.2.4 Corrosión erosiva	26
2.2.5 Corrosión localizada	27
3. MONITOREO DE LA CORROSION INTERNA EL GASODUCTOS	35
3.1 SISTEMA DE EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD	35
3.1.1 Características	35
3.1.2. Aplicación del Mapeo de Corrosión.	36
3.1.3 Aplicación de la detección de fallas	37
3.1.4 Especificaciones del IAS 50	38
3.2. MONITOREO DE LA CORROSIÓN POR BACTERIAS SULFATO-REDUCTORAS	40
3.2.1. Reacción De Oxido Reducción	40
3.3. MONITOREO DE LA CORROSIÓN POR PERDIDA DE PESO	41
3.3.1. Resistencia eléctrica	41
3.4. MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS	47
3.4.1. Monitoreo por resistencia de polarización lineal (LPR)	47

3.5. MÉTODO GRAVIMÉTRICO O DE PÉRDIDA DE PESO	53
3.5.1 Cupones de corrosión	54
3.5.2 Requerimientos generales para pruebas de cupones	55
3.5.3 Esquemas con el detalle de la ubicación de los portacupones para el monitoreo de corrosión en el sistema de inyección	55
3.5.4 Cupones sometidos a pruebas de corrosión	57
3.5.5 Ventajas. Las ventajas de los cupones de pérdida de espesor son:	59
3.5.6 Composición química de los cupones	59
4. DISEÑO DEL PORTA CUPON Y CUPONES GRAVIMETRICOS	61
4.1 PORTACUPONES	61
4.2 PORTACUPÓN RETRÁCTIL	61
4.3. DISEÑO DEL PORTACUPON Y CUPONES GRAVIMÉTRICOS	63
4.3.1 Especificaciones de diseño	63
4.3.2 Esquemas del dispositivo, montaje e instalación.	64
4.3.3. Montaje portacupones retráctil.	66
4.3.4 Cálculo de esfuerzos soportados por el portacupón:	67
4.3.5 Cálculos del portacupón	68
4.3.6 Ecuaciones de Esfuerzo para las piezas del portacupón y cupón:	70
5. DISEÑO DEL SENSOR DE PESO	75
5.1 GALGAS EXTENSOMÉTRICAS.	75
5.1.1 Definición de Galga Extensométrica	75
5.1.2 Relación de Poisson	76
5.1.3 Principio de Funcionamiento de una galga extensiométricas	76
5.1.4 Factor de Galga	77
5.1.5 Efectos de la Temperatura	78
5.1.6 Clasificación	79
5.2 CIRCUITO DE MEDIDA DE LAS GALGAS	84
5.2.1 Puente de Wheatstone.	85
5.2.2 Diferentes Montajes de Puente.	86
5.2.3 Puente de medida con una galga.	86

5.2.4 Puente de medida con dos galgas	87
5.3 CONFIGURACIÓN DE MEDIO PUENTE.	88
5.4 DISEÑO DEL CIRCUITO	89
5.4.1 Excitación	90
5.4.2 Filtrado	90
5.4.3 Regulación de la fuente de alimentación.	91
5.4.4 Amplificación	93
5.5 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.	96
5.5.1 Calibración de las celdas de carga	96
5.5.2 Especificaciones de la celda de carga	99
5.5.3 Montaje final del sistema de monitoreo	100
CONCLUSIONES	106
RECOMENDACIONES	108
BIBLIOGRAFÍA	109
REFERENCIAS	112
ANEXOS	113

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
FIGURA 1. Pila electrolítica hierro/cobre	21
FIGURA 2. Corrosión uniforme en tuberías	23
FIGURA 3 Velocidad de Corrosión vs. Tiempo	24
FIGURA 4. Corrosión galvánica de dos metales	25
FIGURA 5. Corrosión por hendiduras.	26
FIGURA 6. Corrosión erosiva	27
FIGURA 7 Corrosión por ranura	28
FIGURA 8. Corrosión or pitting causada por CO <sub>2</sub> .	29
FIGURA 9. Corrosión por picadura en tuberías	30
FIGURA 10. Corrosión intergranular en tuberías	31
	31
FIGURA 11. Corrosión bajo esfuerzo.	32
FIGURA 12. Fragilización por hidrógeno	33
FIGURA 13 Características del ataque por bacterias	34
FIGURA 14. Efecto terraza, ataque por acterias NALCO “Corrosión en la Industria Petrolera”. U.S.A. Texas 2007. Pág. 28, 48, 49.	34
FIGURA 15. Equipo la Inspection Technologies	36
FIGURA 16. Reporte MAPEO DE CORROSION RSTRENG	37
FIGURA 17. Probeta Corrosometer. ER (Electrical Resistance): General Guide and AC & GR Series Probe Information. Copyringh Cormon Ltda. 2002.	43
FIGURA 18. prebeta RPL. Roheback Cosasco Systems, Inc. Corraater Probe Selection Guide. Febrero 2008.	47
FIGURA 19. Circuito Equivalente Tipico de prebeta RPL. Roheback Cosasco Systems, Inc. Corraater Probe Selection Guide. Febrero 2008.	48

FIGURA 20. Rango de operación en los sistemas Corrater. Rohrback Cosasco Systems, Inc, Selection Prob Guide, Febrero 2008	51
FIGURA 21 Pruebas SAT con probetas CORROSOMETER. Fuente	53
FIGURA 22. Ubicación portacupón a la salida del tanque de desarenado.	56
FIGURA 23 Detalle tubería a la salida del tanque de desarenado.	56
FIGURA 24. Tubería de salida tanque de almacenamiento. Fuente: Los	57
FIGURA 25. Detalle de tubería salida tanque de almacenamiento. Fuente: Los autores.	57
FIGURA 26 Pitting, cupón A14. CR. (4,429mpy).1200ppp	58
FIGURA 27. Diferencial de peso. Cupones Tubería Argentina. P =100psi, T= 40°C	58
FIGURA 28. Portacupones retráctil y cupones.	62
FIGURA 29. Montaje porta cupones, cupones gravimétricos.	64
FIGURA 30.Montaje Barra, Portacupones, Retráctil y sistema de Seguridad.	65
FIGURA 31. Montaje portacupones retráctil.	66
FIGURA 32 Diagrama de esfuerzo cortante y momento	67
FIGURA 33. Montaje del retráctil y en operación	68
FIGURA 34. Esquema de montaje para la colocación del retráctil sobre la línea de conducción de gas	73
FIGURA 35.Esquema de montaje para la colocación del retráctil sobre la línea de conducción de gas	74
FIGURA 36. Definición de Galga Extensométrica.	75
FIGURA 37. Galga Extensométrica Metálica.	77
FIGURA 38. Puente de Wheatstone.	85
FIGURA 39. Puente con una Galga.	86
FIGURA 40.Puente con Dos Galgas.	87
FIGURA 41. Puente con Cuatro Galgas.	88
FIGURA 42. Configuración de medio puente.	88
FIGURA 43. Alimentación del puente de Wheatstone	90
FIGURA 44. Repuesta de Frecuencia de los Filtros Pasa Bajos.	91

FIGURA 45. Circuito de la fuente estabilizada	92
FIGURA 46. Amplificador de Instrumentación.	94
FIGURA 47. Circuito de amplificador instrumental	95
FIGURA 48. Curva de funcionamiento de la celda de peso	97
FIGURA 49. Especificaciones de la celda de peso	100
FIGURA 50 Diseño sistema monitoreo de corrosión	101

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1.1 Factores de Galgas Comunes.	78
Tabla1.2. Relación de peso Vs voltaje Celda de Carga..	98
Tabla 1.3 Tabla Comparativa técnicas monitoreo de la corrosión por pérdida de peso	102

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A Presión Interna	113
ANEXO B. Presión interna o externa	114
ANEXO C. Norma ASTM. D-2688.	115
ANEXO D. Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials	116
ANEXO E. Norma API 5L.	117
ANEXO F. Norma NACE.RPo 775-2005	118
ANEXO G. Low Power Quad Operational Amplifier	119
ANEXO H. Norma ASTM G1.	121
ANEXO G. Circuito electrónico completo del sensor de peso	122

## RESUMEN

**TITULO:** PROPUESTA DE SISTEMA DE MONITOREO DE LA CORROSIÓN POR PÉRDIDA DE PESO\*

**AUTOR:** MORENO MARTINEZ Juan José\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** Corrosión, Cupones, Portacupones, Celdas de Peso, Monitoreo,

Uno de los problemas frecuentes en transporte de hidrocarburos líquido o gas es el deterioro de sus tuberías y equipos a causa de la corrosión, Incrustaciones Y otros fenómenos como la velocidad y las condiciones de fluido transportado Ocasionando pérdidas significativas a la industria petrolera.

La corrosión representa un problema grave para todo el mundo industrializado, como lo prueba la inversión en el costo y el control de la corrosión que se hace en los países más desarrollados. Este costo es del orden de miles de millones de dólares en los Estados Unidos. El problema de la corrosión en los países en vía de desarrollo se complica aún más por la aparición de factores adicionales que hacen surgir necesariamente una serie de criterios particulares en el manejo de la situación.

Existen varias técnicas para la medición de la corrosión, como son: las pruebas no destructivas, el análisis químico, fluido electroquímico, datos operacionales y monitoreo de corrosión.

El monitoreo de corrosión en esencia es la práctica de la medición del potencial corrosivo de las condiciones de un proceso, a través del uso de probetas, las cuales son insertadas en el proceso y expuestas continuamente a las condiciones ambientales del mismo. Las probetas de monitoreo de corrosión pueden ser dispositivos mecánicos, eléctricos o electroquímicos.

En el presente proyecto se presenta la propuesta de un sistema de monitoreo de corrosión en línea, el cual permite la obtención de datos de pérdida de peso o velocidad de corrosión, esto se logra gracias a un dispositivo Electrónico compuesto de galgas extensiométricas montadas en un puente de Wheatstone, Llamado Configuración de medio puente (celda de peso)

---

\* Proyecto de grado.

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de petróleos. Director: Prof. M.Sc. John Faber Archila Díaz

## ABSTRACT

**TITLE:** CORROSION MONITORING PROPOSAL SYSTEM FOR LOSS WEIGHT \*

**AUTHORS:** MORENO MARTINEZ Juan Jose.\*\*

**KEY WORDS:** Corrosion, Scale, coupons, coupon holders, cells of weight, Monitoring.

One of the frequent problems in transport of oil or gas is the deterioration of his pipes and teams because of the corrosion, Incrustations and other phenomena as the speed and the conditions of transported fluid Causing significant losses to the oil industry.

The corrosion represents a serious problem for the whole world industrialized, like it is proved by the investment in the cost and the control of the corrosion that does in the most developed countries. This cost performs the order of thousands of million dollars in the United States. The problem of the corrosion in the countries in route of development is complicated moreover by the appearance of additional factors that make a series of particular criteria arise necessarily in the handling of the situation.

They exist a wide variety of skills for the measurement of the corrosion, since they are: not destructive tests, the chemical, fluid analysis electroquímico, operational information and monitoring of corrosion.

The monitoring of corrosion in essence is the practice of the measurement of the corrosive potential of the conditions of a process, across the use of probes, which are inserted in the process and exhibited continuously to the environmental conditions of the same one. The probes of monitoring of corrosion can be mechanical, electrical devices or electroquímicos.

The corrosion, since they are: not destructive tests, the chemical, fluid analysis electroquímico, operational information and monitoring of corrosion.

In the present project there appears a proposal of a system of monitoring of corrosion in line, which allows the securing of information of loss of weight or speed of corrosion, this is achieved thanks to an electronic device consisted of gauges extensiométricas mounted in a bridge

---

\* Project grade.

\*\* Physicochemical Engineering Faculty. Ate School of oils. Director: Mg. John Faber Archila Diaz

## INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas frecuentes en el transporte de hidrocarburos líquido o gases el deterioro de sus tuberías y equipos a causa de la corrosión, Incrustaciones Y otros fenómenos como la velocidad y las condiciones de fluido transportado ocasionando pérdidas significativas a la industria petrolera.

La corrosión constituye uno de los principales problemas en la vida de una tubería, esta reduce la resistencia del metal, lo que puede conducir a fugas en las tuberías, en consecuencia se aumentan los costos para la industria del transporte de hidrocarburos, y lo que es aún más importante se ve afectada la seguridad de operación. Por tal motivo es indispensable disponer de sistemas eficientes y confiables de protección contra la corrosión generalizada en ductos de transporte de hidrocarburos y plantas en general que proyecta en la opinión pública la imagen de descuido y por consiguiente genera desconfianza. Internamente los problemas de corrosión significan paradas imprevistas, contaminación del producto terminado y del ambiente, pérdidas materiales e incremento de las condiciones de riesgo en seguridad industrial.

La corrosión representa un problema grave para todo el mundo industrializado, como lo prueba el cuidado que ponen en el costo y el control de la corrosión en los países más desarrollados. Este costo es del orden de miles de millones de dólares en los Estados Unidos. El problema de la corrosión en los países en vía de desarrollo se complica aún más por la aparición de factores adicionales que hacen surgir necesariamente una serie de criterios particulares en el manejo de la situación. Estos factores conforman una cadena que empieza por el hecho de una precaria disponibilidad de los materiales resistentes a la corrosión y termina con la relativamente nueva familiaridad de los ingenieros de los países de menor desarrollo con la ingeniería de la corrosión. La menor intensidad del uso de materiales metálicos, en el estado de desarrollo económico y social se Colombia

inciden en un impacto menor de la corrosión.

Sin embargo a medida que se avance en el desarrollo de los diferentes sectores del país ira aumentando debido a la corrosión.

El objetivo del presente trabajo es plantear un nuevo dispositivo para el monitoreo de la corrosión y medir la velocidad de corrosión de los sistemas de transporte de hidrocarburos como el gas natural y de los sistemas accesorios como las bombas, los compresores y los diferentes tipos de vasijas determinando el tiempo de vida de una forma más precisa la vida útil de este tipo de sistemas.

La propuesta del monitoreo de la corrosión se realizará en lazo abierto mediante cupones retractiles que con la ayuda de un sensor pueda medir la velocidad de corrosión del sistema y que el monitoreo se pueda realizar ya sea tomando lectura por parte del operario en cada punto o monitoreada en línea, con el fin de tener registro del avance de la corrosión.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Elaborar una propuesta de un sistema de monitoreo de la corrosión en gasoductos por el sistema de pérdida de peso.

### **1.2 ESPECÍFICOS**

- ✓ Realizar un estudio de los diferentes técnicas y tecnologías los sistemas de monitoreo de la corrosión existentes para medir la velocidad de corrosión.
- ✓ Diseñar el tipo de sensor y la ubicación en el sistema de monitoreo de la corrosión.
- ✓ Realizar un análisis comparativo del sistemas de monitoreo de la corrosión propuesto y los ya existentes.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1 CORROSIÓN

La norma internacional NACE (Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión ) define la corrosión como el deterioro de un material sólido, generalmente un metal o aleación metálica, causado por la reacción química, electroquímica o física del sólido con el ambiente que lo rodea. También pueden considerarse materiales como: cerámicos, plásticos, caucho, madera, vidrio, etc. Prácticamente todos los ambientes pueden considerarse corrosivos, estos incluyen atmósferas, aguas, gases, ácidos, solventes, aceites, alimentos e incluso el cuerpo humano. El tipo de corrosión depende del grado en que se encuentran comprometidos de los iones, átomos y electrones.

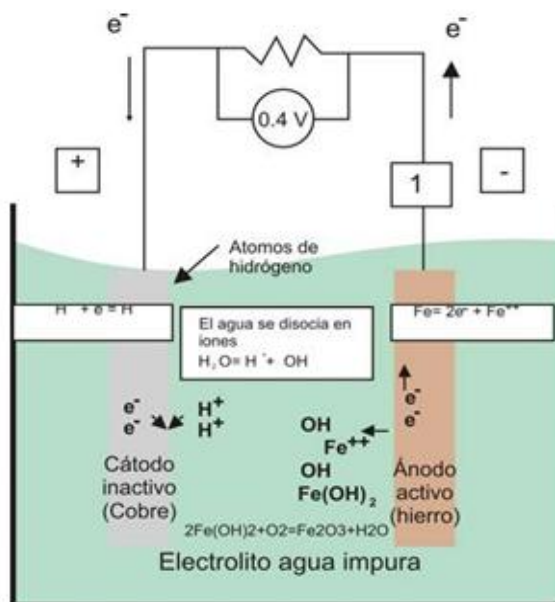
Puesto que la corrosión es causada por una reacción química, electroquímica o física, la velocidad a la que la corrosión tiene lugar depende en cierta medida de la temperatura y de la concentración de reacciones y productos. El esfuerzo mecánico y la erosión son carbonatos o silicatos. En estos estados combinados la energía de los metales es más baja que cuando se encuentran en estado metálico, por lo que los metales tienden espontáneamente a reaccionar químicamente para formar compuestos.

Por ejemplo, los óxidos de hierro existen comúnmente en la naturaleza y para reducirse a hierro metal, cuyo estado energético es superior, se requiere energía.

Sin embargo hay una tendencia del hierro metal a pasar espontáneamente a óxido de hierro por corrosión y así alcanzar un estado de menor energía.

La corrosión de metales puede considerarse en cierta medida como el proceso inverso de su obtención (metalurgia extractiva). La mayor parte de los metales existen en la naturaleza en estado combinado, por ejemplo, los óxidos, sulfuros, de la corrosión se puede ilustrar como se observa en la figura 1, en la cual el hierro es el ánodo metálico activo y el cobre, el cátodo metálico inactivo. El electrón, simbolizado por  $e^-$  es el portador de una carga eléctrica unitaria. Este representa una carga definida arbitrariamente como negativa. Puesto que un átomo pierde uno de sus electrones, se carga positivamente y entonces se llama ión. Los átomos metálicos; en la medida que se disuelven en un electrolito, se ionizan por la pérdida de uno o varios de sus electrones. Los iones dejan el electrolito y se convierten en átomos, puesto que ellos retoman los electrones perdidos. Los electrones, portadores de cargas negativas, pueden circular en los conductores metálicos. Estos se desplazan del lado negativo del circuito hacia el lado positivo como reacción a la diferencia de potencial existente entre el cátodo y el ánodo.

**FIGURA 1. Pila electrolítica hierro/cobre**



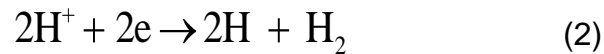
Fuente: Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales; W. Smith 2000.

En la figura 1, el hierro se corroe. Cualquier otro metal menos activo que el hierro, no se corroe y su función en la pila es la de completar el circuito eléctrico requerido para que se desarrolle la reacción en la pila. La corrosión del hierro se produce de acuerdo a las siguientes reacciones:

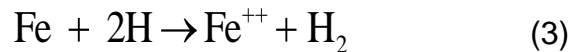
Reacción anódica proceso de oxidación :



Reaccion catodica(*proceso de reduccion*):



Reacción global de corrosión :



Algunos puntos importantes a considerar en las reacciones de oxidación-reducción son:

1. Reacción de oxidación. La reacción de oxidación por la cual los metales forman iones que pasan a la solución acuosa se denomina reacción anódica, y las regiones locales en la superficie del metal donde tiene lugar la reacción de oxidación se denomina regiones anódicas. En las regiones anódicas se desprenden electrones procedentes del metal y se forman cationes metálicos (por ejemplo,  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}$ ).
2. Reacción de reducción. La reacción de reducción en la cual un metal reduce su carga de valencia se denomina reacción catódica. Las regiones locales sobre la superficie del metal donde los iones metálicos o no metálicos reducen su carga de valencia se denomina regiones catódicas. En la región catódica hay consumo de electrones.

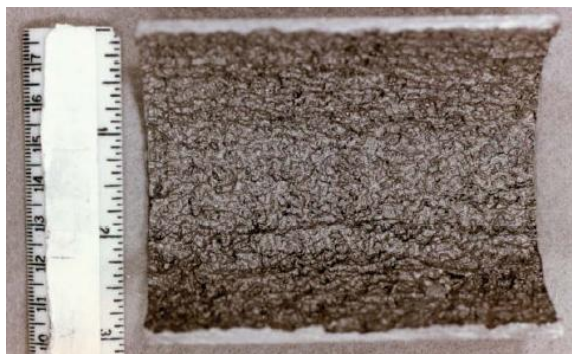
3. Las reacciones de corrosión electroquímicas involucran reacciones de oxidación que producen electrones y reacciones de reducción que los consumen. Ambas reacciones de oxidación y de reducción tienen que acontecer al mismo tiempo e igual velocidad global para prevenir una acumulación de carga eléctrica en el metal.[13]

## 2.2 TIPOS DE CORROSIÓN

Los tipos de corrosión pueden clasificarse convenientemente conforme a la apariencia del metal corroído. Pueden identificarse de muchas formas pero todas ellas están interrelacionadas de alguna manera. Entre ellas están las siguientes

**2.2.1 Corrosión uniforme.** La corrosión uniforme se caracteriza por una reacción química o electroquímica que actúa uniformemente sobre la totalidad de la superficie del metal expuesta al entorno corrosivo. Desde el punto de vista cuantitativo la corrosión por ataque uniforme representa la mayor destrucción de los metales, especialmente los aceros. Sin embargo, su control es relativamente fácil mediante: recubrimientos protectores, inhibidores, protección catódica. En la figura 2 se muestra un ejemplo de corrosión uniforme.

**FIGURA 2. Corrosión uniforme en tuberías**



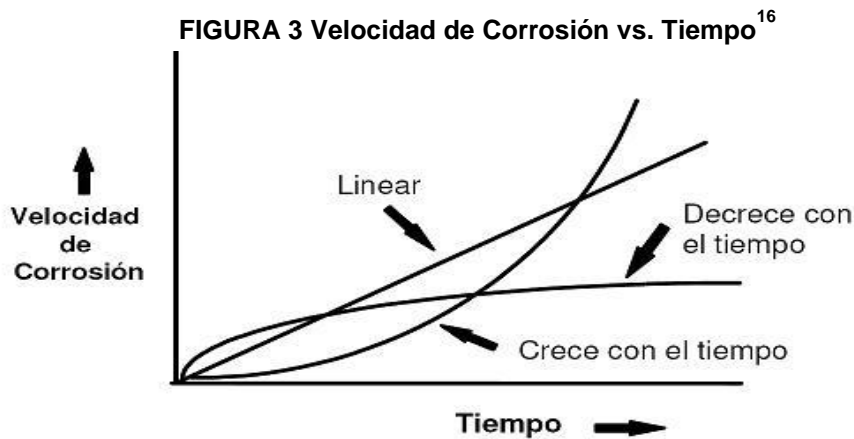
Fuente: <http://www.corrosion-club.com/images/uniform1.jpg>

La corrosión se clasifica en dos grandes clases: general o localizada. En la corrosión general la superficie del material se desgasta uniformemente, permitiendo la predicción del tiempo de vida del material en un ambiente dado.

En la corrosión localizada, el material se desgasta en una pequeña zona lo cual dificulta tanto la detección como la predicción del fenómeno. [1].

**2.2.1.1 Velocidades de corrosión:** Dependiendo del material y ambiente específicos, la velocidad de corrosión puede ser:

- ✓ Lineal.
- ✓ Decece con el tiempo.
- ✓ Se incrementa con el tiempo.

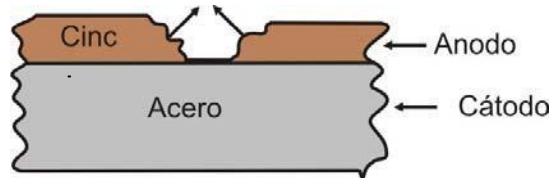


Cuando la velocidad de corrosión es lineal o decece con el tiempo, es posible hacer proyecciones del daño por corrosión

Cuando la velocidad de corrosión se incrementa con el tiempo (de manera exponencial) su predicción a largo tiempo es mucho más difícil.

**2.2.2 Corrosión galvánica de dos metales.** Se debe tener especial cuidado al unir dos metales distintos porque la diferencia de sus potenciales electroquímicos puede conducir a corrosión, esta se caracteriza por el ataque concentrado sobre uno de los dos metales que, en buen contacto entre sí, están expuestos a una solución conductora de la corriente eléctrica. La corrosión galvánica puede considerarse como una forma especial de corrosión uniforme porque el ataque sobre el metal anódico se distribuye casi de una manera uniforme.

**FIGURA 4. Corrosión galvánica de dos metales**



Fuente: Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales; W SMITH 2000.

El acero galvanizado, que es acero recubierto de Zinc, es un ejemplo en que un metal (Zinc) se sacrifica para proteger a otro (acero). El Zinc actúa de ánodo, se corroe y protege al acero que actúa de cátodo en esta pila galvánica, Figura 3.

**2.2.3 Corrosión por hendiduras.** La corrosión por hendiduras es una forma de corrosión electroquímica localizada que puede presentarse en grietas o hendiduras y bajo superficies protegidas donde pueden existir disoluciones estancadas. La corrosión por grietas es de importancia en ingeniería cuando ocurre bajo juntas, remaches y pernos, entre válvulas y sus asientos, bajo depósitos porosos y en muchas otras situaciones similares. La figura 6 muestra un ejemplo claro de corrosión por hendiduras.

La corrosión por grietas se produce en muchos sistemas de aleaciones como acero inoxidable y aleaciones de titanio, aluminio y cobre. Para que ocurra corrosión por grietas, la grieta debe ser suficientemente estrecha para alojar líquidos estancados. Por tanto este tipo de corrosión ocurre frecuentemente con

aberturas de unos pocos micrómetros o menos las juntas fibrosas que pueden actuar como absorbentes de una solución electrolítica y a la vez mantenerla en contacto con la superficie metálica son ubicaciones ideales de corrosión por grietas.

**FIGURA 5. Corrosión por hendiduras.**



Fuente: [http://corrosion.ksc.nasa.gov/corr\\_forms.htm](http://corrosion.ksc.nasa.gov/corr_forms.htm)

**2.2.4 Corrosión erosiva.** Un fluido en movimiento puede entregar parte de su energía a las paredes del ducto o pieza que lo contiene, facilitando por esta razón la corrosión, ya que es capaz de limpiar la superficie, de todos aquellos productos de corrosión que tienden a impedir la continuación del proceso corrosivo. Un fluido en movimiento produce una aceleración de la corrosión por despolarización de la superficie, es decir, el flujo puede retirar rápidamente los iones metálicos formados o destruir los depósitos de productos corrosivos.

La corrosión erosiva puede hasta cierto punto considerarse una especie de intensificación de la corrosión uniforme debido a la velocidad del fluido. La erosión se diferencia de la corrosión en que el primero es un fenómeno puramente mecánico como en la limpieza de superficie por medio de chorro de arena, o en el proceso de molienda o en la erosión de suelos, mientras que el segundo está afectado por una reacción electroquímica que favorece el proceso destructivo.

El aspecto que presenta una superficie erosionada químicamente se caracteriza por la presencia de crestas, ondas, canales, rayas, huecos redondeados, valles y generalmente por la existencia de una tendencia direccional. Generalmente una falla de esta clase es inesperada especialmente porque en los ensayos previos del material no se tuvo en cuenta el efecto de la velocidad del medio sobre la velocidad de corrosión. En la figura 9 se observan las características físicas de la corrosión erosiva.[13]

**FIGURA 6. Corrosión erosiva**



Fuente:[http://www.cdcorrosion.com/mode\\_corrosion/corrosion\\_image/erosion\\_zoom.jpg](http://www.cdcorrosion.com/mode_corrosion/corrosion_image/erosion_zoom.jpg)

**2.2.5 Corrosión localizada.** Este tipo de corrosión es la que más nos interesa pues ésta involucra casi todos los procesos corrosivos y pueden ser:

Macroscópica o microscópica [9].

**2.2.5.1 Macroscópica.-** Es la que se puede apreciar a simple vista y se subdividen en corrosión galvánica, erosión, pitting, exfoliación ataque selectivo y ranura.

- **Galvánica.-** Se produce cuando se utiliza dos metales diferentes en la construcción o montaje, entre estos dos metales existe una diferencia de potencial eléctrico que al final por la producción de una corriente, el metal menos noble se irá desintegrando. Para evitar éste tipo de corrosión, se deberá utilizar en lo Posible materiales que estén próximos en la serie galvánica.

- **Erosión.-** Es la que se produce por condiciones de alta velocidad de fluidos en el proceso, especialmente en codos, impulsores de bombas, agitadores, etc., ésta tiene la apariencia de huecos u hondas con direccionalidad, para disminuir éste tipo de corrosión se deberá utilizar materiales de alta aleación o mejor resistencia, mejorar el diseño de ingeniería o aplicar revestimientos.

La Fig.2.17, muestra un ejemplo de una tee de acero al carbón con signos de corrosión por erosión. La forma de los pits indica la dirección del flujo.



Fuente. NALCO "Corrosión en la Industria Petrolera". U.S.A. Texas 2007.Pág.70.

- **Ranura.-** Se producen en juntas, remaches, por la acumulación de la humedad, suciedad, productos de la corrosión, rasguños en la pintura protectora, Usualmente ocurre en metales con buen recubrimiento protector. Sin embargo en las ranuras, hay lugares donde el recubrimiento protector no llega hasta el fondo y puede ocurrir corrosión localizada severa. Fig.

**FIGURA 7. Corrosión por ranura**



Fuente. NALCO "Corrosión en la Industria Petrolera". U.S.A. Texas 2007.Pág.26,

- **Pitting.-** Es una forma de corrosión localizada y ocurre cuando un metal es protegido por una película que es parcialmente resistente, o también por el contacto directo con aguas corrosivas, éste tipo de corrosión es muy peligrosa por ser la más destructiva, pues los pittings son difíciles de detectar y cuantificar, producen fallas repentinas además que el proceso de desarrollo es auto catalítico, pues dentro de los pittings se producen condiciones que estimulan la actividad de formación de nuevos pittings.

Las fallas por Pitting se presentan en medios que contienen cloro o cloruros y la mayoría de estas aguas están presentes en los fluidos de producción de los pozos de agua de formación.

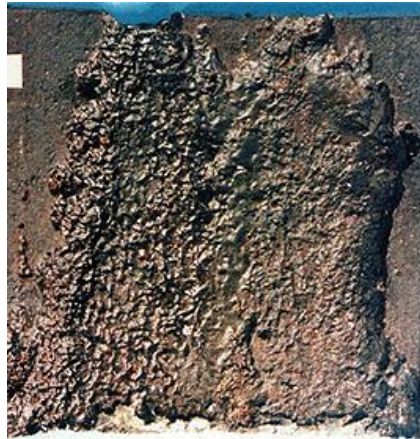
Para prevenir éste tipo de corrosión se recomienda mantener el PH alto, tratar las aguas con hidróxidos, cromatos o silicatos, incrementar la velocidad de flujo y el uso de recubrimientos.[9]

**FIGURA 8. Corrosión or pitting causada por CO<sub>2</sub>.**



Fuente: <http://www.corrosion-club.com/images/uniform1.jpg>

**FIGURA 9. Corrosión por picadura en tuberías**



Fuente: <http://www.stockinterview.com/News/03042007/internal-pipe-corrosion.gif>

- **Exfoliación.-** Es un tipo de corrosión Sub-Superficial que se ha propagado bajo la superficie del metal, produciendo destrucción de capas completas de material, dando el aspecto de escamas o ampollas, ésta se produce en procesos con alta temperatura y presencia de oxígeno.
- **Ataque selectivo.-** Es la eliminación de un elemento de la aleación, ejemplo: la desincificación en una aleación de cobre y zinc, éste tipo de corrosión es peligrosa, pues el metal que queda ha perdido totalmente las propiedades mecánicas de la aleación para éste tipo de corrosión es el uso de aleaciones estables y no susceptibles a la descomposición.

**2.2.5.2 Corrosión microscópica.-** En éste caso la cantidad de metal perdido o disuelto es mínimo y el daño que causa puede ser alto, no es visible al ojo humano y requiere de procedimientos especiales para detectarlo, como rayos X, ultrasonido, líquidos penetrantes, etc., los más comunes son:

**2.2.5.3 Corrosión intergranular.** La corrosión intergranular es un ataque de corrosión localizada o adyacente a los límites de grano de una aleación.

En condiciones ordinarias si un metal se corroe uniformemente, los límites de grano serán sólo *ligeramente más reactivos que la matriz*. Pero, bajo otras condiciones las regiones de límites de granos pueden ser muy reactivas, dando lugar a una corrosión intergranular que cause pérdidas de resistencia en la aleación e incluso una disgregación en los límites de grano.

En general esta forma de corrosión se explica por un mecanismo enteramente electroquímico o por uno en el cual se supone un cambio químico, casi siempre la precipitación de un compuesto sólido que aumenta la reactividad de las zonas cerca de los granos. Por supuesto la reactividad aumenta por razones que en el fondo son electroquímicos. La figura 7. muestra un ejemplo de la corrosión Intergranular. [9]

**FIGURA 10. Corrosión intergranular en tuberías**



Fuente: NALCO "Corrosión en la Industria Petrolera". U.S.A. Texas 2007.Pág.6.

**2.2.5.4 Corrosión asistida por esfuerzo SCC (Stress Corrosión Cracking).** La rotura debida a corrosión por esfuerzo de metales se refiere a la rotura causada por el efecto combinado de esfuerzos de tensión y un entorno corrosivo específico actuando sobre el metal. Durante la corrosión por esfuerzo el ataque que recibe la superficie del metal es generalmente muy pequeño mientras que las grietas

aparecen perfectamente localizadas y se propagan a lo largo de la sección del metal.

Las altas tensiones residuales capaces de causar corrosión por esfuerzo pueden ser consecuencia, por ejemplo de tensiones térmicas introducidas por velocidades desiguales de enfriamiento, de un diseño mecánico defectuoso para esfuerzos, de transformaciones de fase durante el tratamiento térmico, el trabajo en frío o la soldadura.[13]

La figura 8 muestra la forma como penetra en el metal la corrosión bajo esfuerzo.

**FIGURA 11. Corrosión bajo esfuerzo.**



Fuente: [http://corrosion.ksc.nasa.gov/corr\\_forms.htm](http://corrosion.ksc.nasa.gov/corr_forms.htm)

**2.2.5.5 Fragilización por hidrógeno.** La fragilización por hidrógeno resulta de la invasión del hidrógeno en la matriz del metal, lo cual hace que el metal llegue a ser quebradizo y frágil como un vidrio. El SSC es un caso especial de fragilización por hidrógeno ya que el sulfuro de hidrógeno es uno de los químicos que causa el hidrógeno al invadir metales susceptibles al SSC. La fragilización frecuentemente ocurre en conexiones roscadas que ajustan metales diferentes, lo cual puede involucrar corrosión galvánica y altos esfuerzos en las roscas. Los aceros de baja resistencia son susceptible a la fragilización por hidrogeno a temperaturas por encima de 425° F (220° C) debido a la descarburización y a la salida del gas

metano.

La fragilización es grave porque ocurre sin aviso y suele ser asociado con altas presiones, altos esfuerzos, y ambientes ácidos. La figura 9 muestra un caso de fragilización por hidrógeno.

**2.2.5.6 Corrosión microbiológica.** Es el resultado de la actividad de microorganismos, en el proceso metabólico los organismos consumen y generan otros, que influyen en el proceso corrosivo, además las condiciones de temperatura en el proceso ayudan a la proliferación de bacterias, las soluciones para ésta situación es el uso de bactericidas o aireación del agua.

**FIGURA 12. Fragilización por hidrógeno**



Fuente: 23 NALCO "Corrosión en la Industria Petrolera". U.S.A. Texas 2007. Pág. 41.

En algunos casos, las bacterias producen ácidos, que causan la corrosión. En otros casos, con las bacterias se produce  $H_2S$  que puede causar corrosión por  $H_2S$ .

Con el  $CO_2$ , puede ocurrir un ataque de  $CO_2$  en el punto de ruptura de la película por las bacterias. El ataque microbiológico se caracteriza usualmente por agujeros redondos, con filos, lados y fondo bien definidos. [9]

**FIGURA 13 Características del ataque por bacterias**



**FIGURA 14. Efecto terraza, ataque por bacterias NALCO “Corrosión en la Industria Petrolera”. U.S.A. Texas 2007. Pág.28, 48, 49.**



### **3. MONITOREO DE LA CORROSION INTERNA EL GASODUCTOS**

#### **3.1 SISTEMA DE EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD**

Sistema Ultrasónico de campo desplegable para mapeo de corrosión y detección general de fallas.

La Inspección Technologies es un sistema diseñado para la integridad, y es Automático para la evaluación de tuberías y otras estructuras críticas.

##### **3.1.1 Características**

- Sistema completo con capacidades de mapeo de fallas y espesores
- Capacidad de evaluación de corrosión interna y externa
- Configuración de inspección
- Imagen completa con barridos tipo A, B, C y D, visualización en pantalla seccionada y cursores de medición para análisis próximos.
- Interacción seleccionador con el operador de acuerdo a API1163
- RSTRENG y ASTM B31G y B31G de tuberías modificado mantienen software de análisis
- Generador de reportes
- Paquete resistente a ambientes de uso rudo
- Controlador de 2 ejes integrado
- Cinco canales de ultrasonido con un transductor ultrasónico opcional
- Grupo de datos integrado para soporte de servicio remoto

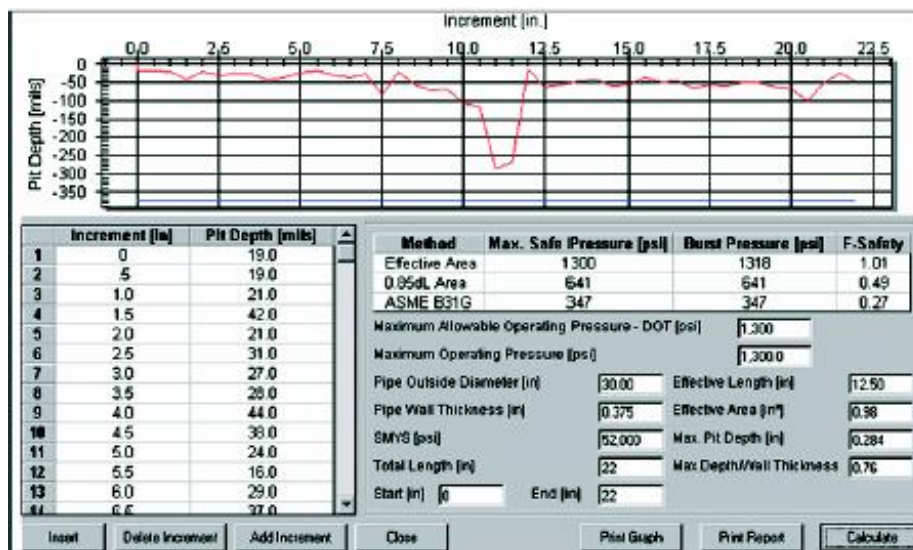
**FIGURA 15. Equipo la Inspection Technologies**



El sistema consiste de una gran interpretación, 5 canales de equipos de pruebas ultrasónicas acoplados con un controlador de 2 ejes y de un sistema de adquisición de datos con la aplicación de imágenes específicas y software de análisis, por último un robot de barrido automático mecanizado con 2 ejes se encuentra disponible en el mercado con una serie de transductores ultrasónicos y sostenedores de los mismos para soportar inspecciones automáticas en superficies curvas y planas. Cuando la productividad de la inspección es requerida, el sistema es fácilmente configurable para realizar el barrido con un transductor de 5canales interrumpiendo la inspección actual.[10]

**3.1.2. Aplicación del Mapeo de Corrosión.** La corrosión es un mecanismo de falla predominante para tuberías de gas y aceite, calentadores industriales y otras estructuras ferrosas, contiene la funcionalidad para realizar mapeos simultáneos de corrosión interna o externa proporcionando al operador imágenes topográficas con barridos tipo D y pantallas seccionadas de superficies corroídas así como espesores compuestos de la pieza inspeccionada.

FIGURA 16. Reporte MAPEO DE CORROSION RSTRENG



**3.1.3 Aplicación de la detección de fallas.** Es fácilmente configurado para un sistema de detección de fallas multicanal automatizado usado para localizar y dimensionar exactamente las fallas existentes dentro de los componentes a inspeccionar.

En el modo de detección de fallas, el operador tiene la flexibilidad de ajustar o configurar el instrumento hasta que el barrido A en pantalla para cada canal ultrasónico se complete con la curva DAC/TCG, las compuertas de evaluación, la ganancia y otros no menos importantes ajustes de canal.

Una vez que el plan de inspección sea programado en el sistema, automáticamente explorará una pieza y proporcionará una imagen de barrido C del área verificada para un análisis y una evaluación a futuro.[10]

### **3.1.4 Especificaciones del IAS 50**

#### **Frecuencia de Repetición de Pulsos**

Hasta 20 KHz

#### **Pulsador**

Pulso pico 100 V, 400 V

Tiempo de elevación < 10 ns

#### **Ganancia**

0-110 dB, variable en pasos de 0.5 dB

#### **Rectificación**

Onda completa, media onda negativa y positiva, modo RF

#### **TCG**

40 dB con máximo de 6 dB /  $\mu$ s

#### **Velocidad de sonido**

0.02 – 0.6 pulgadas /  $\mu$ s 500 – 15000 m/s

#### **Velocidad de muestreo**

400 Hz, 9 bits

#### **Compuertas de evaluación**

Cuatro compuertas independientes por canal

#### **Sistema de operación**

Microsoft Windows XP

**Capacidad de imágenes**

Barrido A, C y D, visualizaciones seccionadas

**Software de análisis**

RSTRENG, ASME B31G, ASME B31G modificado

**Viaje del eje Y**

Hasta 60 cm. / 24 pulgadas 45 cm. / 18 pulgadas estándar

**Salidas de alarma**

16 salidas TTL programables por el usuario para ambas inspecciones detección de fallas y medición de espesores.

**Unidades**

Metros o pulgadas

**Fuente de energía**

115 / 220 CAV

**Temperatura de operación**

0 – 40 ° C / 32 – 104 ° F

**Resolución de amplitud**

0.5 % de rango en pantalla

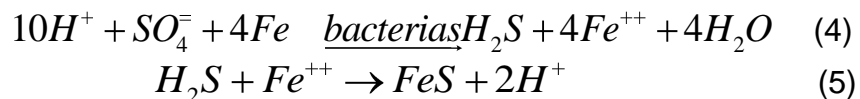
**Resolución de espesores**

10 ns correspondientes a 0.001 pulgadas, 0.03 mm en acero

## 3.2. MONITOREO DE LA CORROSIÓN POR BACTERIAS SULFATO-REDUCTORAS

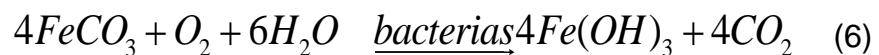
Las bacterias sulfato reductoras (BSR), son organismos anaerobios que presentan la facultad de reducir los iones sulfato del medio para producir ácido sulfhídrico, así como algunos presentan un sistema de enzimas que remueven el hidrogeno formado en el área catódica, acelerando el proceso de la corrosión. De esta manera se dice que las bacterias sulfato reductoras promueven la corrosión localizada en ausencia de oxígeno.

### 3.2.1. Reacción De Oxido Reducción



La primera reacción es la total de oxidación -reducción. La bacteria actúa sobre las zonas catódicas, cambiando drásticamente el patrón del proceso corrosivo. Se reconoce la acción de esta bacteria agregando ácido clorhídrico a la superficie, debiéndose percibir el olor característico del ácido sulfhídrico. La bacteria actúa en sistemas en los que hay pobres condiciones de aireación.

Bacterias del hierro.



Su acción provoca taponamientos, picaduras y dificulta la transferencia de calor. Algunas bacterias no actúan directamente en el proceso corrosivo pero pueden incidir indirectamente en él. Las bacterias del nitrógeno, por ejemplo, convierten los nitritos en nitratos y pueden producir amoniaco, lo cual puede ser especialmente nocivo cuando se usan aleaciones de cobre.[9]

### **3.3. MONITOREO DE LA CORROSIÓN POR PERDIDA DE PESO**

**3.3.1. Resistencia eléctrica.** Las pruebas de corrosión por medio de resistencia eléctrica se basa en los cambios en la resistencia de piezas metálicas o alambres de los materiales por efecto de la disminución de su sección transversal, por la pérdida de peso de metal. Existen equipos comerciales como el Corrosometer® que se emplean para llevar a cabo pruebas de corrosión mediante este método. Las pruebas consisten en exponer las muestras al ambiente para que el equipo grabe de forma periódica las lecturas; traduciendo la velocidad de corrosión como la pérdida de peso del metal entre cada dos lecturas.

Las probetas de resistencia eléctrica (ER) pueden ser consideradas como cupones de corrosión “electrónicos”. Al igual que los cupones, las probetas E/R proveen una medición de la pérdida de metal de un elemento expuesto a un ambiente corrosivo, pero a diferencia de los cupones, la magnitud de la pérdida de metal puede ser medido en cualquier momento, a la frecuencia que sea requerida, mientras la probeta se encuentre in-situ y permanentemente expuesto a las condiciones del proceso.

La técnica E/R mide el cambio en la resistencia eléctrica (Ohms) de un elemento metálico corroído expuesto al medio ambiente del proceso. La acción de la corrosión en la superficie del elemento produce un decrecimiento en el área de la sección transversal de dicho sensor, lo cual representa un incremento en la resistencia eléctrica. El aumento en esta resistencia puede ser relacionada directamente con la pérdida de metal, y como la pérdida de metales es una función del tiempo, es la definición de la tasa de corrosión. Aunque es una técnica que promedia la corrosión en el tiempo, los intervalos entre cada medición puede ser mucho más cortos que los de los cupones de pérdida de peso.

Las principales ventajas de este tipo de pruebas es que pueden llevarse a cabo en periodos de tiempo cortos, además de que los estudios pueden realizarse en exposiciones a gases corrosivos, la velocidad de corrosión se puede determinar sin tener que realizar observaciones a la muestra ni retirarla del equipo. Además el método puede detectar velocidades de corrosión bajas, las cuales requerirían periodos prolongados para su determinación por el método de pérdida de peso.

La desventaja más importante de este método es que no es posible determinar si existe corrosión localizada. Asimismo, si el producto de corrosión presenta una conductividad eléctrica cercana a la del metal, los resultados indicarán una velocidad de corrosión pequeña o nula. Además es importante mencionar que no se pueden realizar este tipo de pruebas si el ambiente es un electrolito. [10]

**3.3.1.1. Principio de operación<sup>1</sup>.** La resistencia eléctrica de una sección de material conductor de electricidad como un metal puede ser expresada por la formula

$$R = \rho * \frac{L}{A} \quad (7)$$

Dónde:  $\rho$ , es la resistividad eléctrica intrínseca del material.

L, es la longitud de la sección.

A, es la zona de sección transversal

**3.3.1.2 Selección y preparación de probetas:** Las probetas E/R tiene todas las ventajas del cupón, pero adicionalmente son aplicables en todos los ambientes de trabajo, líquidos, gaseosos, sólidos, flujos con partículas sólidas, además la tasa de corrosión puede ser obtenida de forma directa, la probeta puede mantenerse instalada y conectada en línea hasta que su vida operacional haya sido agotada y

---

<sup>1</sup> Rohrback Cosasco Systems, Inc. Corrosometer Probe Selection Guide. Febrero 2008

responden de forma rápida a los cambios en las condiciones corrosivas, y pueden ser utilizado como disparador de alarmas.

**FIGURA 17. Probeta Corrosometer. ER (Electrical Resistance): General Guide and AC & GR Series Porbe Information. Copyringh Cormon Ltda. 2002.**



Las probetas a utilizar, deberán ser compatibles con el niple de acceso de 2", para ser instalada o retirada bajo presión, Seleccionar la sensibilidad de la probeta tomando como base una vida útil de 1 año de servicio, Seleccionar la forma del elemento medible de acuerdo a su sensibilidad y a su posición dentro del tubo.

El tamaño de la probeta estará en función del diámetro de la tubería y a su posición dentro del tubo:

- **Probeta de elemento tipo cilíndrico y tipo loop.**

$$\text{Longitud} = P + T + 1.25 \quad (8)$$

- **Probeta de elemento tipo rasante**

$$\text{Longitud} = T + 1.25 \quad (9)$$

Dónde:

P = Penetración requerida dentro del tubo en pulgadas

T = Espesor de pared del tubo en pulgadas

⌘ Nota. Tamaños de acuerdo a un niple de acceso estándar de 5.25" y un espacio

de soldadura de 1/16”.

El elemento metálico de la probeta será de acero al carbón SAE-1010 o SAE-1018. Si se reutiliza una probeta en un sistema, limpiarla mecánicamente antes de que sea instalada, con el fin de remover óxidos o películas de inhibidor, desengrasar si es necesario para completar la limpieza. Esta operación provocará un cambio en la lectura, por lo cual es conveniente que se efectúe la primera lectura inmediatamente a su instalación.

- **Instalación de Probetas de Resistencia Eléctrica**

Instalar o retirar la probeta empleando el retriever, como fue descrito para la técnica gravimétrica. Emplear tapón hueco en lugar de tapón sólido.

- ✓ La superficie del elemento sensor de la probeta a utilizar no deberá presentar signos de daños Mecánicos.
- ✓ Se deberá tener cuidado durante la instalación y manejo de la probeta, para evitar la alteración de la superficie del elemento metálico.
- ✓ La probeta deberá instalarse en una posición representativa en el fluido corrosivo, evitando su colocación en puntos muertos, donde las condiciones de temperatura y flujo no representan al sistema real.
- ✓ Al instalar y tomar lecturas, tener precaución de no dañar las conexiones de la probeta.

**3.3.1.3 Determinación de la corrosión:** Dependiendo del equipo empleado, las lecturas pueden proporcionar automáticamente la velocidad de corrosión. Si el equipo no cuenta con esta opción, las mediciones se harán manualmente.

La velocidad de corrosión es la relación de la pérdida de peso acumulada respecto al periodo de tiempo en consideración.

Verificar la correcta operación del equipo de medición, mediante la probeta de referencia suministrada, de acuerdo a las instrucciones del manual de operación del instrumento.

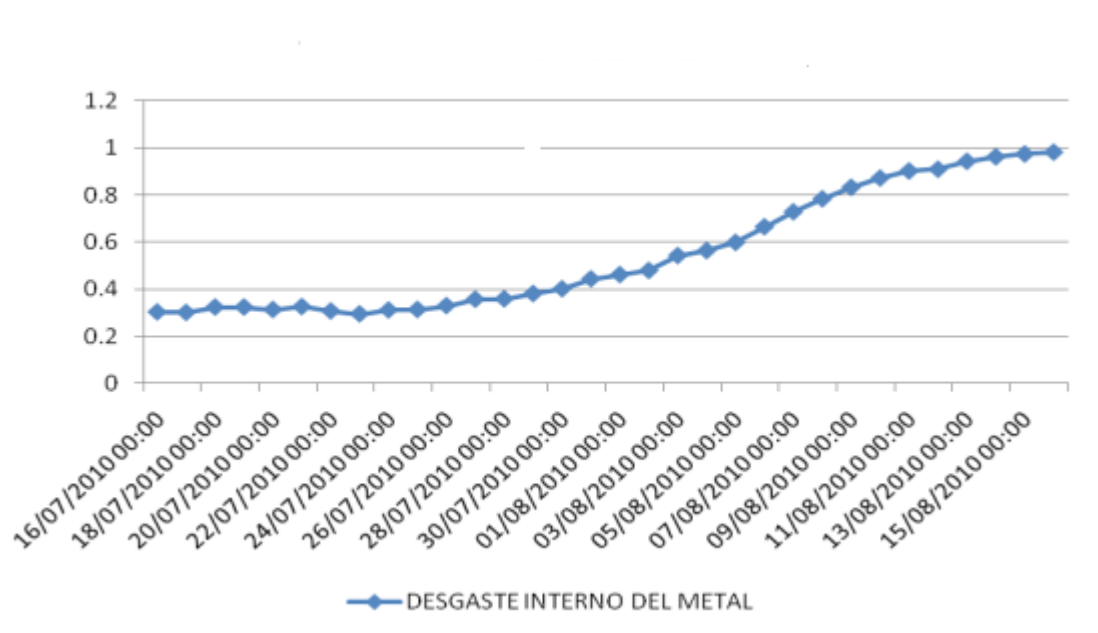
Efectuar de dos a tres lecturas para verificar que sean estables y tomar un valor promedio.

Convertir las lecturas tomadas, a pérdida de metal del elemento, de acuerdo a las instrucciones del manual de operación del instrumento.

El valor máximo permisible de velocidad de corrosión utilizando esta técnica, es de 2 mpy, la cual se considera aceptable. Si se excede de este valor, verificar las condiciones de operación en la línea y tomar las medidas correctivas.

En la siguiente grafica se interpretan los datos de la tabla, la cual muestra un incremento en la pérdida de metal interno debido a que el inhibidor de corrosión no actúa de manera eficiente.[10]

**GRÁFICA 1. CURVA DE CORROSIÓN POR (RE)**



Grafica No. 1. Desgaste interno del ducto colectados con Equipo de Medición Instantánea exportados del Software original a Windows.

La velocidad de corrosión en milésimas de pulgadas por año (mpy) se obtiene al multiplicar el valor de la pendiente por 365 días:

<b>Pendiente</b>	<b>Velocidad de Corrosión(mpy)</b>
<b>0.025919571</b>	<b>9.46064332</b>

### 3.4. MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS

#### 3.4.1. Monitoreo por resistencia de polarización lineal (LPR)

FIGURA 18. prebeta RPL. Roheback Cosasco Systems, Inc. Corratel Probe Selection Guide. Febrero 2008.



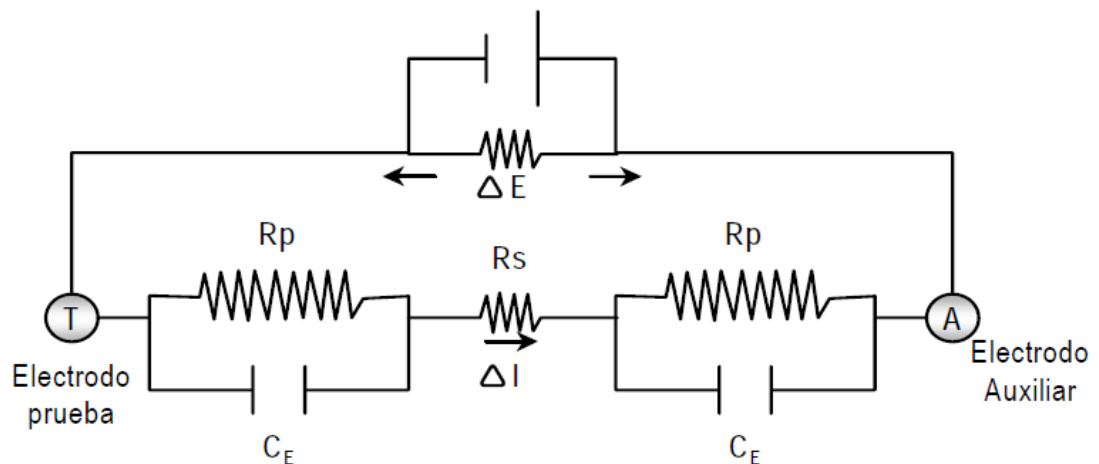
Prácticamente todos los procesos de corrosión son electroquímicos en la naturaleza. Estos requieren de la presencia de un ánodo, un cátodo, un electrolito y un circuito para conectar el ánodo y el cátodo. La técnica interactúa con el mecanismo de corrosión con el fin de determinar la velocidad a la que pasan los iones metálicos en solución. Si fuera posible medir directamente la densidad de corriente de corrosión que pasa entre el ánodo y el cátodo sería posible conocer la reacción de corrosión, para determinar la cantidad o masa del metal que pasa a la solución, es decir, la tasa de corrosión. No es posible medir directamente desde los ánodos y cátodos que existen en las zonas adyacentes de la misma pieza del material. Sin embargo, mediante el uso de al menos dos electrodos de metal en virtud de la prueba, es posible aplicar potenciales pequeños entre los electrodos y medir el resultado. Si los electrodos se están corroyendo a un ritmo elevado con iones metálicos que pasan fácilmente a solución, un pequeño potencial aplicado entre los electrodos produce una corriente de alta o baja resistencia a la polarización.[10]

Por el contrario, si los electrodos se están corroyendo a una baja tasa o los iones pasan lentamente a solución, un pequeño potencial aplicado entre los electrodos produce una baja tasa o alta polarización, por lo tanto una baja resistencia corresponde a una alta velocidad de corrosión.

Puesto que solo se aplican potenciales pequeños entre los electrodos, el proceso natural de corrosión no es perturbado. Basados en el análisis electroquímico demostrado por Stern y Geary, cuando se aplican pequeños potenciales, la densidad de corriente de corrosión es:

Un circuito equivalente se da en la siguiente figura 18.

**FIGURA 19. Circuito EquivalenteTípico de prebeta RPL. Roheback Cosasco Systems, Inc. Corratier Probe Selection Guide. Febrero 2008.**



La resistencia a la polarización lineal (RPL) es un método que se emplea para la determinar la velocidad de corrosión. El método consiste en la aplicación de un sobre-potencial, respecto del potencial de equilibrio, lo suficientemente pequeño como para no alterar el sistema pero suficiente como para poder conocer cuál es el comportamiento del electrodo en ese medio frente a las reacciones de oxidación

y de reducción. De esta forma, se puede seguir la evolución del proceso de corrosión con el tiempo.

Este método asume que la corrosión electroquímica se predice de forma correcta por la ecuación clásica de Stern-Geary (Ecuación 1) (Hakka et. al, 1995).

$$i_{corr} = \frac{b_a b_c}{R_p (2.3 b_a + b_c)} \quad (10)$$

Dónde:  $i_{corr}$  es la densidad de corriente de corrosión,

$R_p$  es la resistencia a la polarización y  $b_a$  y  $b_c$  son constantes para el metal.

La principal ventaja de la polarización lineal es que es un método no destructivo. Otra ventaja es que pueden estimarse valores de resistencia a la corrosión y convertirse a velocidades de corrosión, permitiendo determinar la rapidez con la que se corroerá el metal o estimar la vida útil del mismo. Mediante la ecuación de Stern-Geary se pueden relacionar la resistencia a la corrosión y la corriente de corrosión para polarización lineal, pudiéndose transformar ésta última en velocidad de corrosión.

Entre las desventajas que presenta este método se encuentran el que únicamente mide corrosión general, además de que resulta complicado obtener los datos para metales que presentan índices de corrosión bajos.

**3.4.1.1. Determinación de la velocidad de corrosión:** Las probetas Corratel es una técnica que miden la velocidad de corrosión instantánea de un metal en un fluido conductor usando la técnica de Resistencia a la Polarización Lineal.

(LPR). Esta técnica electroquímica consiste en la aplicación de un diferencial de voltaje por encima del potencial de oxidación de los electrodos (material en estudio) permitiendo medir en la interface metal / electrolito la densidad de electrones liberados producto de la disolución del metal. Teniendo en cuenta que la corrosión es un proceso electroquímico en donde los electrones son transferidos entre áreas anódicas y catódicas en el metal que se está corroyendo, la determinación de la velocidad de transferencia de los electrones o densidad de corriente, es un indicativo de la velocidad de disolución del metal. Esto no es posible medirlo desde ánodos y cátodos adyacentes existentes en áreas adyacentes de la misma pieza del material. Sin embargo, por el uso de mínimo dos electrodos del metal bajo estudio, es posible aplicar pequeñas diferencias de potencial entre los electrodos y medir la corriente resultante. Si los electrodos se corroen a una velocidad alta con iones metálicos pasando fácilmente dentro de la solución, un pequeño potencial aplicado entre los electrodos produce una alta corriente o baja resistencia a la polarización, como también ocurre el caso inverso.

La acumulación de depósitos sobre los electrodos pueden afectar los resultados.

No es recomendable para el fenómeno de corrosión-erosión

La ecuación que relaciona la velocidad de corrosión en (MPY), el voltaje Aplicado ( $E_a$ ) y la corriente medida ( $I_m$ ) a causa de dicho voltaje es:

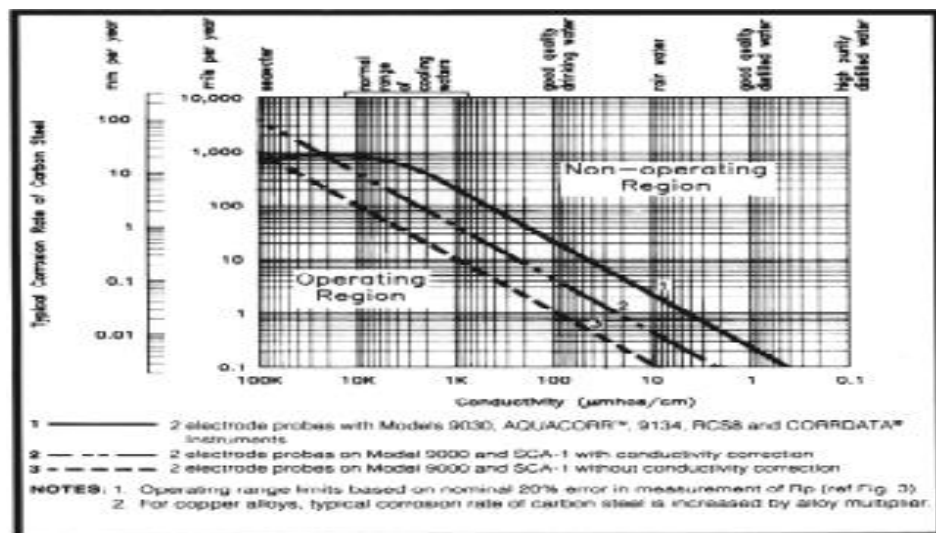
$$MPY = K1 * K2 * (I_m / E_a) \quad (10)$$

Con  $K1$  y  $K2$  constantes para ajustar unidades.

Una limitante de esta técnica es que opera solamente en medios conductores como es el caso del agua de enfriamiento y en medios acuosos que contengan como máximo un 5% de hidrocarburo, sin embargo, alrededor de este límite el

hidrocarburo puede cubrir los electrodos e impedir la conexión eléctrica para el fluido del proceso, y por tanto la probeta necesitaría estarse limpiando con alguna frecuencia, así, para las cimas de vacío es aconsejable emplear la técnica Corrosometer. En la figura 19 se puede ver el rango de operación de la técnica.[10]

**FIGURA 20. Rango de operación en los sistemas Corratel. Rohrback Cosasco Systems, Inc, Selection Prob Guide, Febrero 2008**



**3.4.1.2. Selección y Preparación de Probetas:** Las probetas comerciales están compuestas generalmente de 2 ó 3 electrodos, dependiendo de la conductividad del medio acuoso.

- ✓ La probeta a utilizar, deberá ser compatible con el niple de acceso de 2" para ser instalada bajo presión.
- ✓ Seleccionar la forma de los electrodos de la probeta, de acuerdo a su posición en el interior de la tubería.

- ✓ El material de los electrodos de la probeta será de acero al carbón SAE-1010 o SAE-1018.
- ✓ Los electrodos deben estar libres de impurezas como herrumbre, grasa y humedad.
- ✓ Si estos se encuentran sucios, limpiarlos mecánicamente y desengrasarlos de acuerdo al método A.S.T.M.

**3.4.1.3. Instalación de probetas:** La probeta deberá ser instalada en una posición representativa en el fluido corrosivo, donde exista una separación definida de la fase acuosa, como en puntos de acumulación de agua.

- ✓ Los electrodos deberán quedar inmersos totalmente en la fase acuosa.
- ✓ Tener cuidado de no dañar las conexiones de la probeta, para no tener lecturas erróneas.
- ✓ Es recomendable utilizar probetas nuevas o cambiar los electrodos para cada instalación.
- ✓ Instalar la probeta mediante el equipo retriever.

**3.4.1.3. Análisis de las pruebas:** Los equipo que utiliza la técnica de resistencia eléctrica para calcular la pérdida de metal, entrega dos valores: El primero es el check, que es constante y deberá ser observado también en el ICMS3 (sistema integrado de monitoreo de la corrosión) dividido en mil. El segundo es el valor división, este valor puede ser convertido en pérdida de metal, utilizando la siguiente formula:

$$\text{Metal loss (mils)} = (\text{División} / 1000) * \text{spam} (7)$$

El valor de spam es la vida útil de la probeta en mils, para nuestro caso es 10 mils, con estos datos se puede calcular la pérdida de metal de los dos equipos tomados:

$$\text{Metal loss (mils)}_{E-250B} = (44/1000) * 10 = 0.44 \text{mils}$$

$$\text{Metal loss (mils)}_{E-251B} = (35/1000) * 10 = 0.35 \text{mils}$$

En las gráficas siguientes de pérdida de metal de los resultados de pruebas SAT con probetas se muestra en la primera parte de la gráfica un aumento acelerado de la pérdida de metal, luego en un tiempo corto se estabiliza y empieza a disminuir de manera gradual hasta llegar a un valor casi constante de 0.436 mils.

Esto muestra una pasividad que debe aumentar muy lentamente a medida que pase el tiempo.

**FIGURA 21 Pruebas SAT con probetas CORROSOMETER. Fuente**



### 3.5. MÉTODO GRAVIMÉTRICO O DE PÉRDIDA DE PESO

El método de pérdida de peso relaciona el daño causado por la corrosión con pérdida de peso en los materiales. Las pruebas de inmersión total que emplean el método de pérdida de peso consisten en exponer piezas pequeñas de metal a

ambientes corrosivos, para determinar la pérdida de peso del material después de la pruebas (NACE, 1984).

Este método es uno de los más usados en estudios de oxidación y corrosión para determinar el grado de afectación en los metales. Esto se debe a que los resultados obtenidos por este método son considerados confiables, al asemejarse a resultados obtenidos en pruebas de en planta; si se cuidan las condiciones al realizar las pruebas (Perry & Green, 2003). Las pruebas de corrosión mediante el método de pérdida de peso se consideran el método más rápido y satisfactorio para hacer una selección preliminar de los mejores materiales en estudio para una determinada aplicación (Roberge, 2000).

Existen diferentes aparatos para determinar la velocidad de corrosión mediante este método. Los aparatos que determinan de forma continúa el peso del testigo son muy populares en academia para realizar estudios de corrosión (Lai, 1990).

Lo anterior se debe a que pueden recopilarse datos de la cinética de la reacción. Por otro lado, la principal desventaja es que sólo una muestra o testigo puede ser analizado en cada corrida, lo cual hace que el generar datos comparativos para varios tipos de sistemas y materiales sea un proceso largo.[10]

**3.5.1 Cupones de corrosión.** Los cupones son piezas simples de metal elaborados a partir del material del sistema que va a ser evaluado, y que presenta por tanto las mismas características de corrosividad. Estos permiten evaluar la corrosión uniforme y corrosión por erosión del sistema.

Preliminarmente se realiza un registro de las propiedades de los cupones, para que luego del ensayo sean analizados y permitan evaluar la tasa de corrosión debido a la pérdida de peso.

Las dimensiones de los cupones para el ensayo están determinadas por la norma ASTM D 2688.

**3.5.2 Requerimientos generales para pruebas de cupones.** Hay un número de requerimientos para una buena práctica que aplican a las pruebas con cupones:

- Los historiales químicos y del proceso del material en el cupón deben ser conocidos.
- El cupón debe estar positivamente identificado, usualmente por números codificados grabados en el espécimen.
- Los datos acerca de la prueba a un cupón específico debe estar registrado en un libro de registros permanente. Los ítems que deben ser registrados son la información detallada en el cupón (composición química y propiedades mecánicas, e historia del proceso), dimensiones del cupón, peso inicial del mismo, condición inicial de la superficie y tiempo de exposición.

**3.5.3 Esquemas con el detalle de la ubicación de los portacupones para el monitoreo de corrosión en el sistema de inyección.** Se instalarán dos portacupones para el monitoreo de corrosión ubicados a la salida del pozo inyector. Para tener una mejor perspectiva a cerca del sistema de inyección en líneas de transporte de crudo

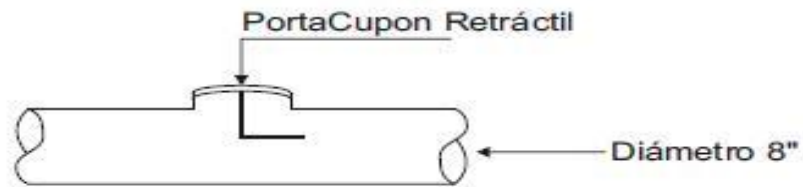
A continuación se muestra de forma detallada el diseño de la ubicación del sistema a de monitoreo en el sistema de inyección de agua seleccionado:

**FIGURA 22. Ubicación portacupón a la salida del tanque de desarenado.**



Fuente: L.C, Bueno; Y.S. García. Tesis de grado. 2011

**FIGURA 23 Detalle tubería a la salida del tanque de desarenado.**



Estas pruebas dieron como resultado la medición de velocidad de corrosión y de incrustación en cada sitio de monitoreo, estas se realizaron siguiendo el protocolo para la medición de cupones Ecopetrol-ICP ECP-VPR-I-022. [11]

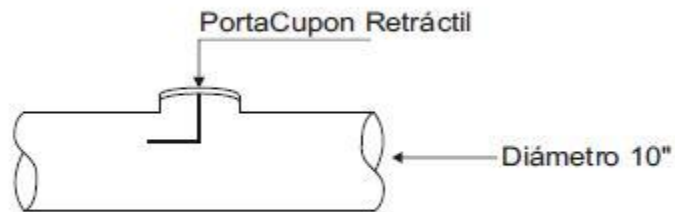
**Ubicación segundo portacupón a la salida de un tanque de almacenamiento antes de los filtros.**

**FIGURA 24. Tubería de salida tanque de almacenamiento. Fuente: Los**



Fuente: L.C, Bueno; Y.S. García. Tesis de grado. 2011

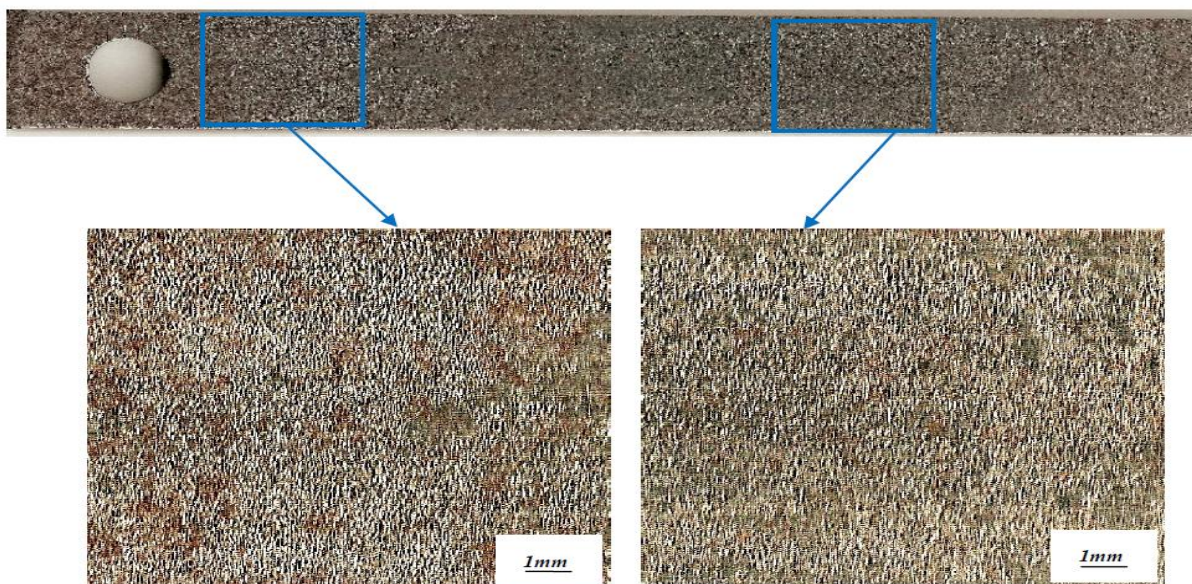
**FIGURA 25. Detalle de tubería salida tanque de almacenamiento. Fuente: Los autores.**



Fuente: L.C, Bueno; Y.S. García. Tesis de grado. 2011

**3.5.4 Cupones sometidos a pruebas de corrosión.** A continuación se muestra cada uno de los cupones y el ataque que han sufrido en las diferentes condiciones de prueba.

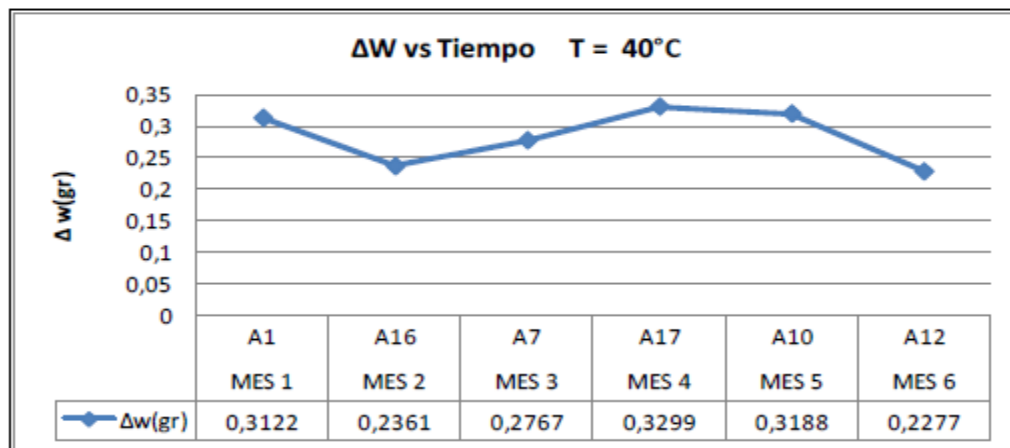
**FIGURA 26 Pitting, cupón A14. CR. (4,429mpy).1200ppp**



Fuente, Luis Alberto Miranda Riobamba Ecuador

En la Fig.26 se observa que se da una pérdida de peso alta en el primer mes para decaer en el segundo, para luego ir variando en forma parabólica presentando un pico alto en el cuarto mes, esto se puede dar debido al tiempo de formación de una capa de escoria que actúa como una capa protectora de los cupones.

**FIGURA 27. Diferencial de peso. Cupones Tubería Argentina. P =100psi, T= 40°C**



Fuente, Luis Alberto Miranda Riobamba Ecuador

**3.5.5 Ventajas.** Las ventajas de los cupones de pérdida de espesor son:

- La técnica es aplicable a todos los ambientes (gases, líquidos y flujos con partículas sólidas).
- Puede realizarse inspección visual.
- Los depósitos de incrustación pueden ser observados y analizados.
- La pérdida de peso puede ser fácilmente determinada y la tasa de corrosión puede ser fácilmente calculada.
- La corrosión localizada puede ser identificada y medida.
- La eficiencia de los inhibidores puede ser fácilmente determinada.

**3.5.6 Composición química de los cupones.** Para el análisis, se toma una muestra de la parte longitudinal de las tuberías en cuestión. De acuerdo a lo estipulado por la Norma API 5L en la tabla 2a – PSL1 para este tipo de tubería la norma exige los siguientes valores [21]:

SPECIFICATION FOR LINE PIPE						
Table 2A—PSL 1 Chemical Requirements for Heat and Product Analyses by Percentage of Weight						
(1)	(2)	(3)	(4)		(5)	(6)
Grade & Class	Carbon, Maximum <sup>a</sup>	Manganese, Maximum <sup>a</sup>	Phosphorus		Sulfur, Maximum	Other
			Minimum	Maximum		
Seamless						
A25, C1 I	0.21	0.60		0.030	0.030	
A25, C1 II	0.21	0.60	0.045	0.080	0.030	
A	0.22	0.90		0.030	0.030	
B	0.28	1.20		0.030	0.030	b, d
X42	0.28	1.30		0.030	0.030	c, d
X46, X52, X56	0.28	1.40		0.030	0.030	c, d
X60 <sup>e</sup> , X65 <sup>e</sup> , X70 <sup>e</sup>	0.28	1.40		0.030	0.030	c, d
Welded						
A25, C1 I	0.21	0.60		0.030	0.030	
A25, C1 II	0.21	0.60	0.045	0.080	0.030	
A	0.22	0.90		0.030	0.030	
B	0.26	1.20		0.030	0.030	b, d
X42	0.26	1.30		0.030	0.030	c, d
X46, X52, X56	0.26	1.40		0.030	0.030	c, d
X60 <sup>e</sup>	0.26	1.40		0.030	0.030	
X65 <sup>e</sup>	0.26	1.45		0.030	0.030	
X70 <sup>e</sup>	0.26	1.65		0.030	0.030	

El monitoreo se realizará utilizando la técnica de materiales de exposición, utilizando portacupones retráctiles y cupones de sacrificio y suspendidos, los cuales deben ser del mismo material del sistema a medir, en este caso de acero comercial, según lo establece la norma NACE RP 0775 [11] .

Para la medición de los cupones se realizarán pruebas morfológicas de corrosión e incrustación, examinando las capas de los productos de corrosión formados sobre ellos y se realizarán los ensayos necesarios para determinar su composición, consistencia y densidad. Posterior a esto se realiza la prueba gravimétrica, se implementará el instructivo para la medición de corrosión mediante cupones elaborado por integridad técnica – ICP. ECP – VPR – I –022.

## **4. DISEÑO DEL PORTA CUPON Y CUPONES GRAVIMETRICOS**

### **4.1 PORTACUPONES**

Para la sujeción de los cupones se emplearán portacupones específicos, la especificación depende de la forma del cupón empleado.

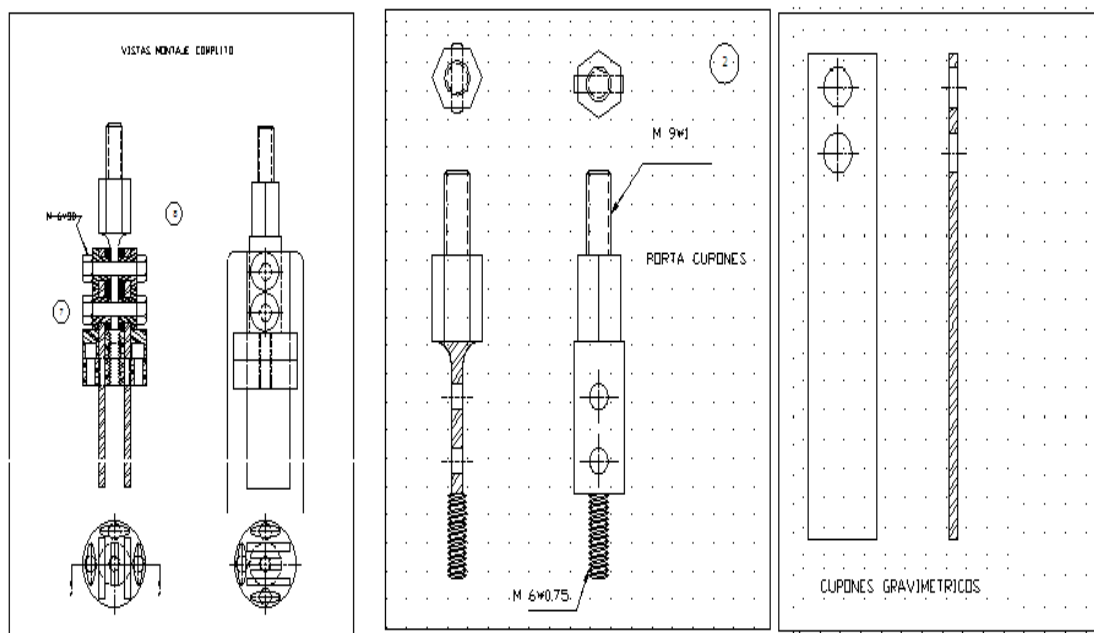
Los portacupones empleados deberán cumplir con los siguientes requerimientos:

- ✓ Permitir un adecuado soporte de los cupones.
- ✓ Adecuado aislamiento eléctrico entre el cupón y el portacupones para evitar la corrosión galvánica
- ✓ Mantener el cupón en la orientación y posición adecuada con respecto al flujo
- ✓ Facilidad de manejo en la instalación y retiro de los cupones bajo condiciones de operación

### **4.2 PORTACUPÓN RETRÁCTIL**

El diseño que es comúnmente usado en la industria petroquímica, producción petrolera, plantas de compresión de gas, sistemas de inyección de agua, refinación, etc., es el portacupón tipo retráctil mostrado en la figura, 27

**FIGURA 28. Portacupones retráctil y cupones.**



Fuente John Faber Archila

Este diseño de portacupón emplea un “packing gland” que permite la inserción y remoción a través de una válvula de bola, sin la despresurización de sistema. Una cadena y grapa de seguridad son también suministradas para prevenir un violento retroceso por efectos de la presión. Los portacupones retráctiles pueden ser usados hasta 1500 psi y 500 F (260 C), además están contruidos de acero inoxidable AISI 316L. Normalmente un “packing gland” de 1”NPT es usada en conjunto con una válvula de bola de paso completo de 1”, o 1-1/2”dependiendode el tipo de configuración de cupón seleccionado

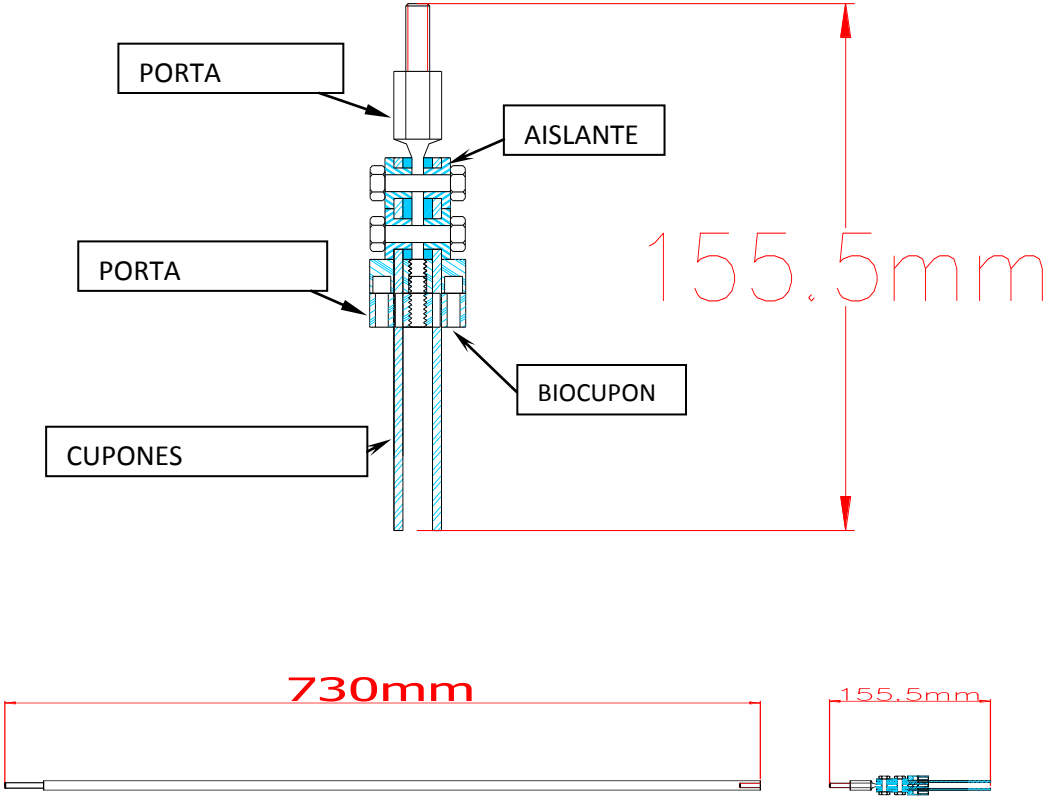
### 4.3. DISEÑO DEL PORTACUPON Y CUPONES GRAVIMÉTRICOS

#### 4.3.1 Especificaciones de diseño

1.1 Presión de diseño:	1440 PSI (9.928 Mpa)
1.1.1 Presión de operación:	1200 PSI
1.2 Temperatura de diseño:	37.7 °C (100 °F)
1.3 Velocidad máx de flujo	12 m/s a una Presión min de operación 350 psi
1.4 Diámetro de Tubería mínimo	10 “
1.5 Especificaciones:	Ajustable a prensa de características dadas por el ICP
1.6 Sistema de Seguridad:	Compuesto por pernos, placa de sujeción Válvula de alivio rating 600 lbs
1.7 Material:	AISI 316 (S = 45500 PSI) HRA
1.8 Instalación:	El porta cupones está diseñado para ubicar los biocupones en flush es decir al borde de la tubería y sumergir los cupones gravimétricos quienes tienen una longitud de 6 cm ( se trabaja con un área expuesta al flujo máxima de 0.0036 m <sup>2</sup> ). Este diseño también permite hacer monitoreo apantallado

**4.3.2 Esquemas del dispositivo, montaje e instalación.** Esquema montaje porta cupones, cupones gravimétricos y biocupones.

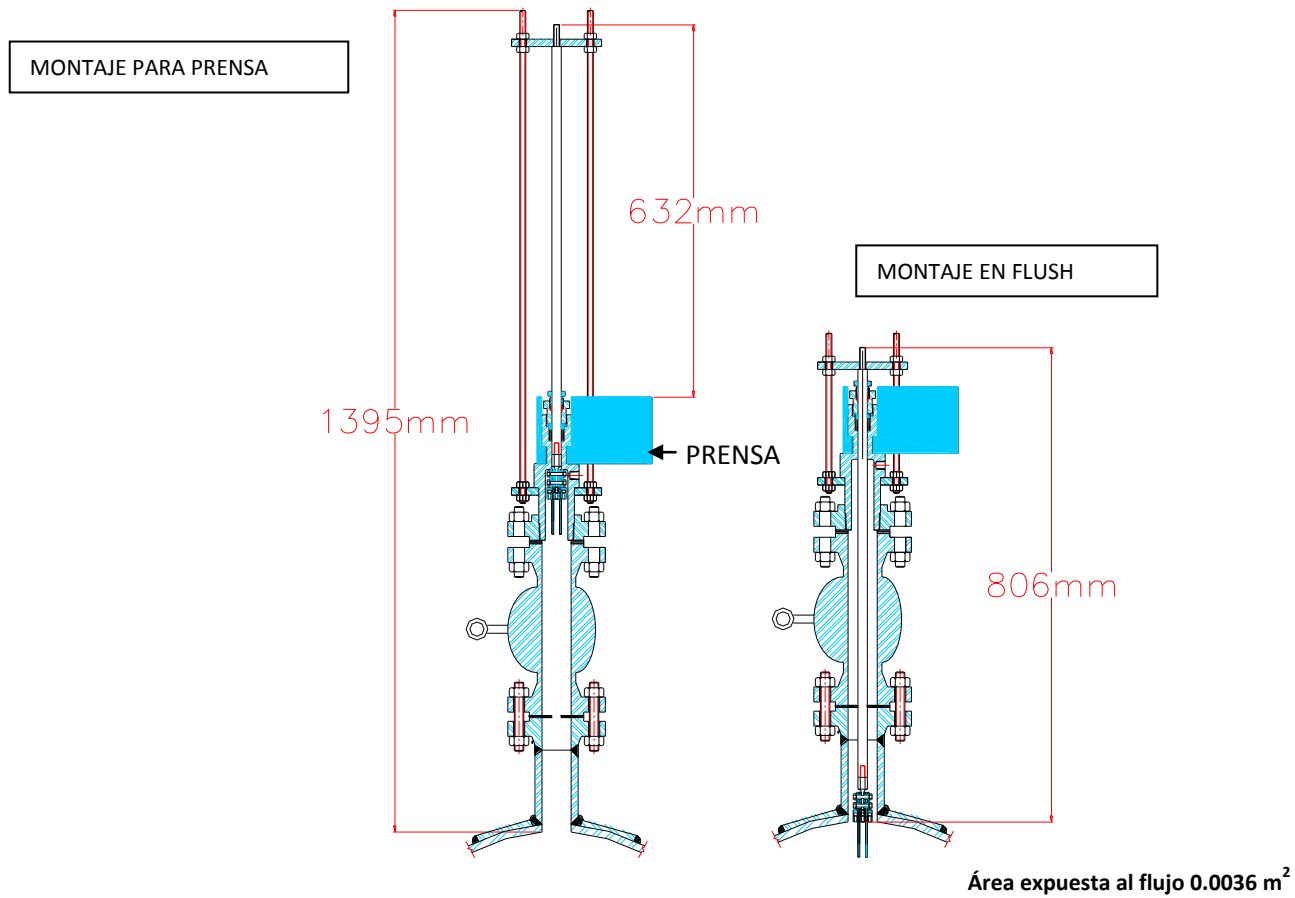
**FIGURA 29. Montaje porta cupones, cupones gravimétricos.**



Fuente John Faber Archila

Montaje Barra, Porta cupones, Retráctil y sistema de Seguridad.

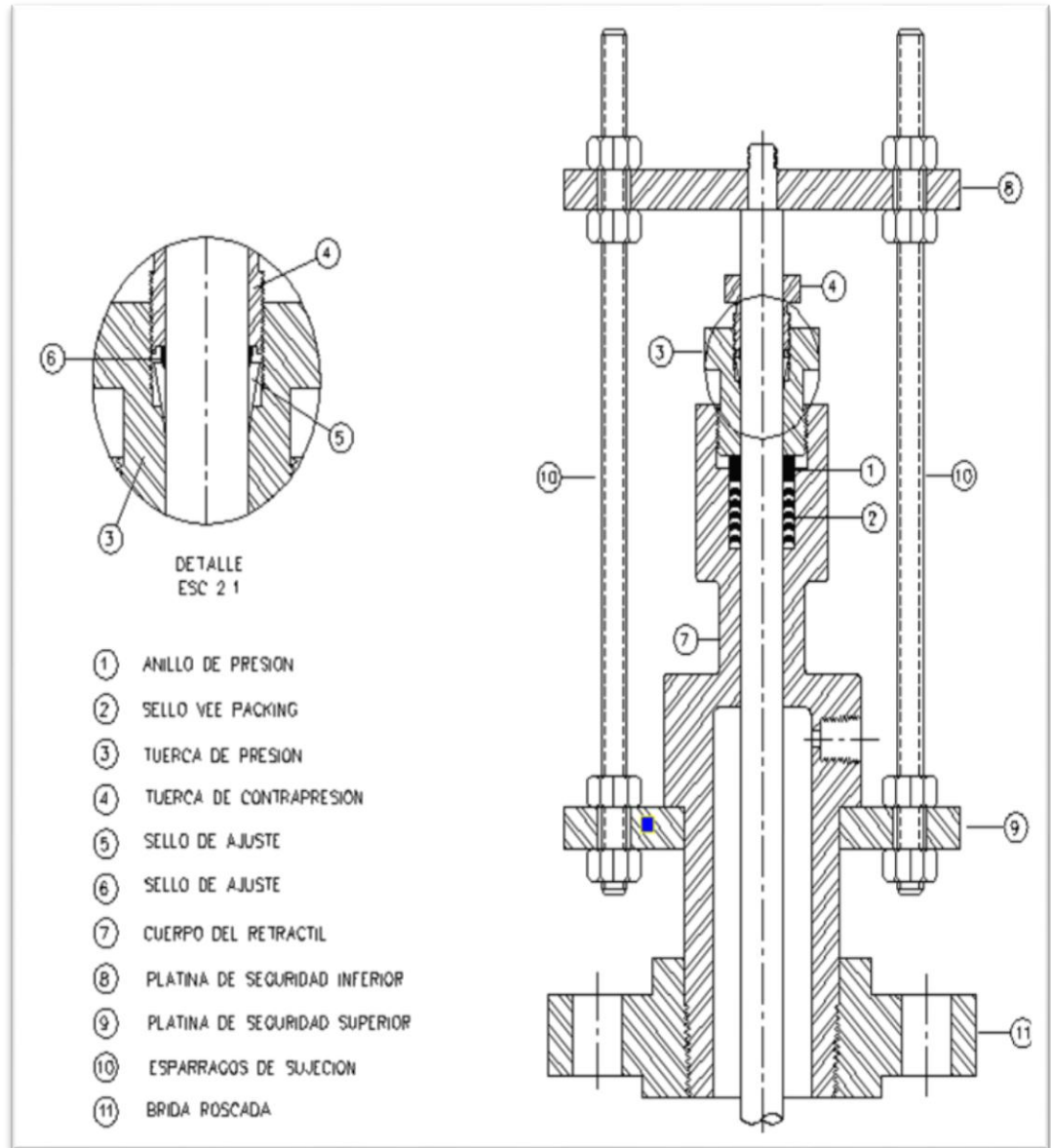
FIGURA 30. Montaje Barra, Portacupones, Retráctil y sistema de Seguridad.



Fuente John Faber Archila

### 4.3.3. Montaje portacupones retráctil.

FIGURA 31. Montaje portacupones retráctil.

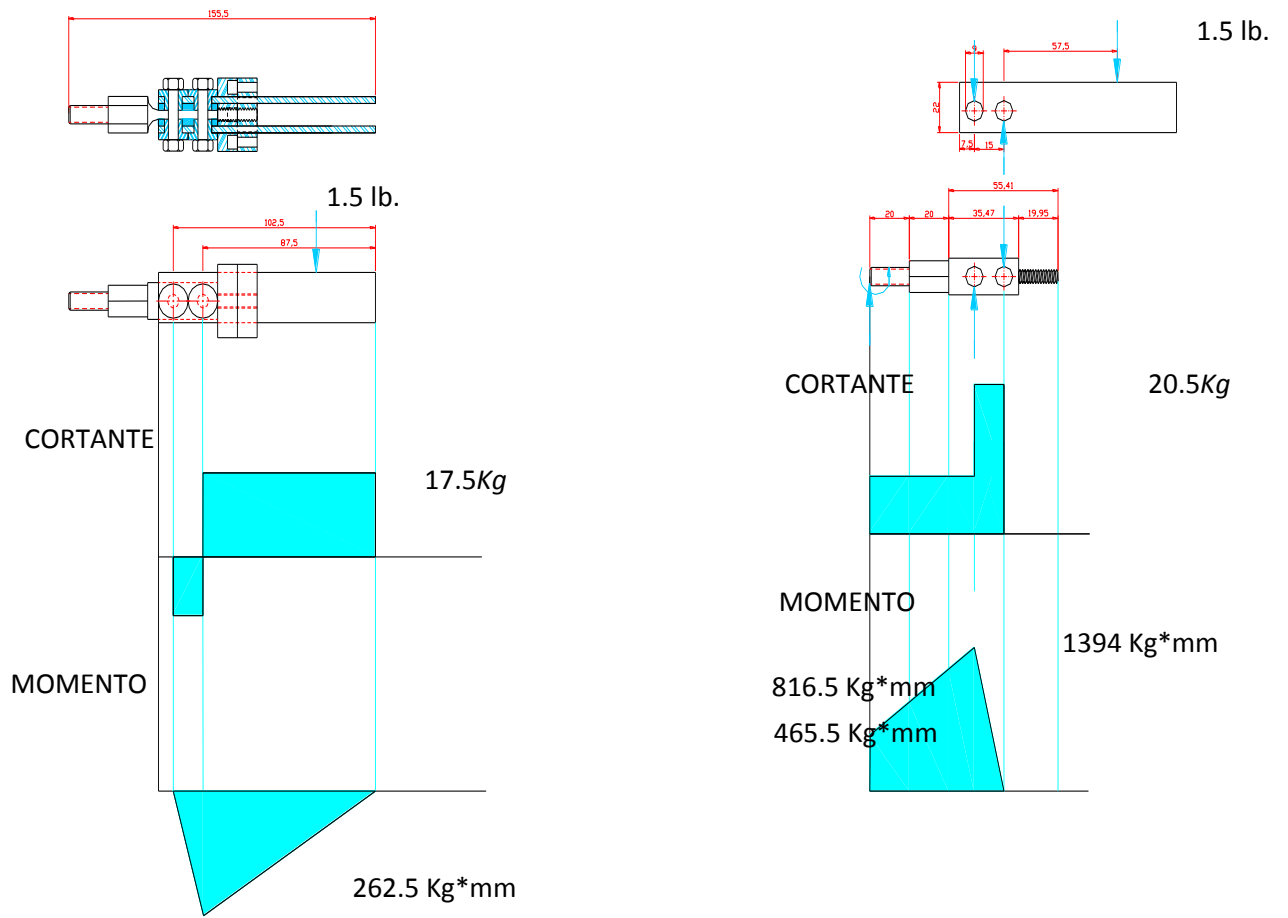


Fuente John Faber Archila

### 4.3.4 Cálculo de esfuerzos soportados por el portacupón:

Diagramas de cortante y de momento:

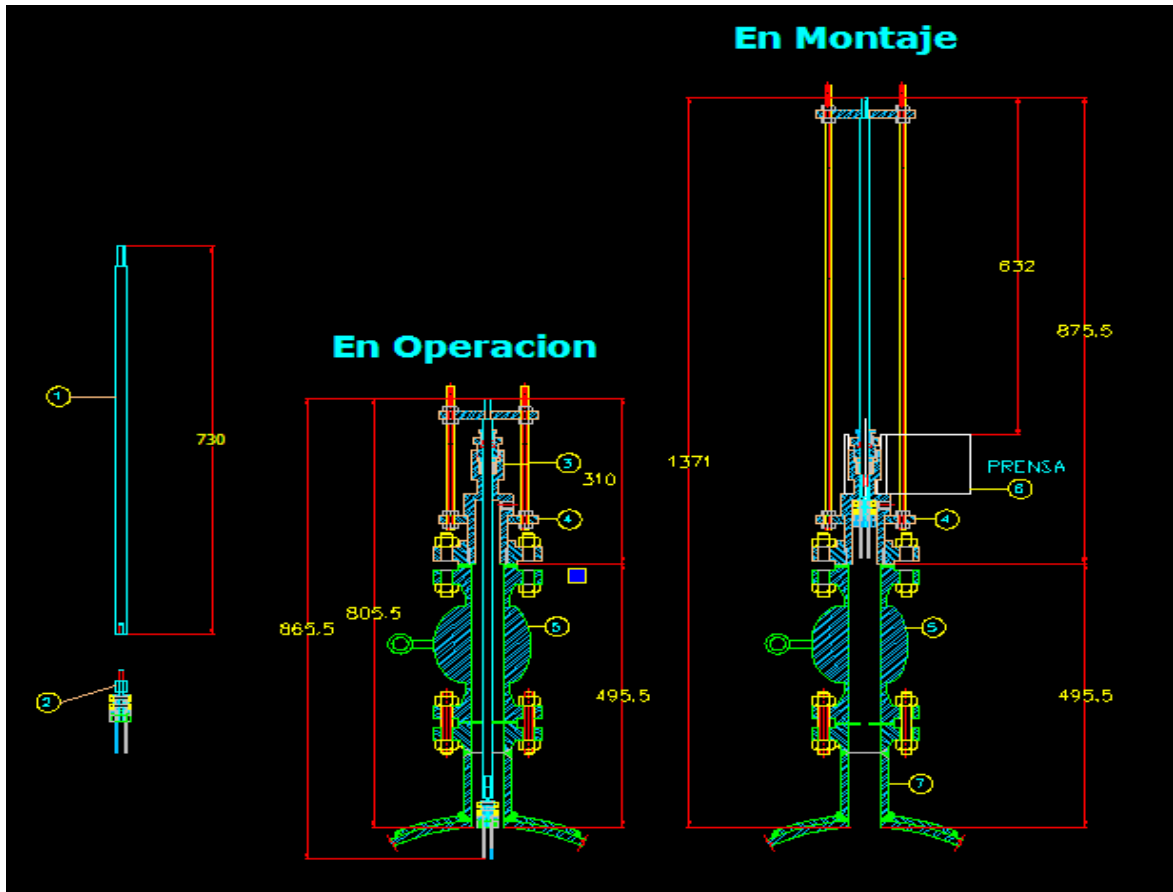
FIGURA 32 Diagrama de esfuerzo cortante y momento



Fuente John Faber Archila



Montaje Total del retráctil con cupones en flush sobre la línea de conducción de gas



ITEM	PIEZA	MATERIALES	DATOS DE DISEÑO
1	BARRA PORTA CUPONES	A316	Diam Access Fitting 1.5"
2	PORTA CUPONES Y BIOCUPONES	SS A 316, PTFE Y API 5LX	Diam Barra 5/8"
3	RETRACTIL	AISI 4140	Prestan de diseño 1440 psig
4	SISTEMA DE SEGURIDAD	A38	
5	VALVULA DE BOLA $\phi$ 2"		Rating 600 lbs
6	PRENSA	ALEACION DE ALUMINIO	
7	ACCESS FITTING	$\phi$ 1.5"	

Fuente John Faber Archila

#### 4.3.6 Ecuaciones de Esfuerzo para las piezas del portacupón y cupón:

$$\sigma = \frac{32 * M}{\pi * D^3} \quad \sigma = \frac{M * C}{I} \quad (12)$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \sigma = \frac{6 * M}{h * (b - d)^2} \quad \sigma_b = \frac{F}{A_b} \quad (13)$$

Dónde:

$\sigma$  = Esfuerzo normal.

$\tau$  = Esfuerzo cortante.

M = Momento soportado por la pieza.

D = Diámetro.

C = Distancia máxima al centro.

I = Momento de inercia.

A = área de la sección transversal.

F = Fuerza aplicada.

b = Alto

d = Diámetro de agujero

h = Espesor

$A_b$  = Área de aplastamiento

Para la porta cupón se tiene:

$$\sigma = \frac{32 * 81.65}{\pi * 0.859^3} = 1312.13 \text{ kg} / \text{cm}^2 = 19288 \text{ psi}$$

$$N = \frac{45500}{19288} = 2.359$$

$$\sigma = \frac{6 * 139.4}{0.388 * (1.6 - 0.6)^2} = 1262 \text{ kg} / \text{cm}^2 = 18549.3 \text{ psi}$$

$$N = \frac{45500}{18549.3} = 2.453$$

Para el cupón gravimétrico se tiene:

$$\sigma_b = \frac{20.5}{0.3 * 0.6} = 113.888 \text{ kg} / \text{cm}^2 = 1647.16 \text{ psi}$$

$$\tau = \frac{20.5}{0.3 * (2.2 - 0.9)} = 52.56 \text{ kg} / \text{cm}^2 = 772.69 \text{ psi}$$

Para el acople entre la barra y el porta cupones:

$$\sigma = \frac{M * C}{\pi / 2 * (D^4 - d^4)}$$

$$\sigma = \frac{46.65 * 0.8}{\pi / 2 * (1.6^4 - 0.9^4)} = 4.03 \text{ kg} / \text{cm}^2 = 59.22 \text{ psi}$$

Para los pernos de sujeción entre los cupones gravimétricos:

Tornillos M5\*0.5 ASTM A193 grado B7

$$\tau = \frac{20.5}{0.145} = 141.4 \text{ kg/cm}^2 = 2078.3 \text{ psi}$$

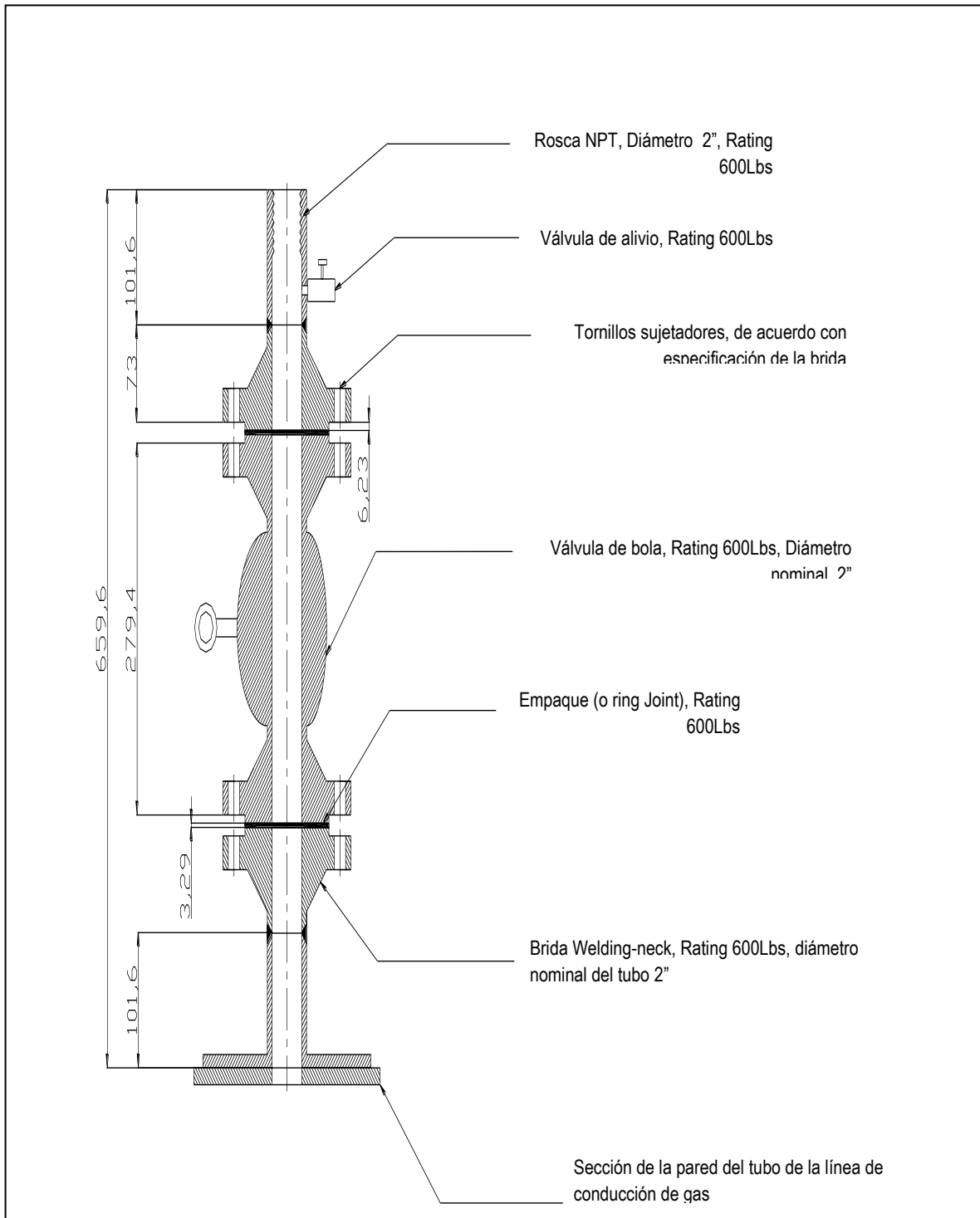
El cálculo de la velocidad de corrosión de los cupones gravimétricos se realiza de acuerdo a la siguiente fórmula. Obtenida de la norma ASTM G1 (Anexo H).

Velocidad de corrosión (VC)

$$V_c = \frac{\text{perdida de peso (g)} * K}{\text{Densidad de aleación (g/cm}^3\text{)} * \text{area expuesta (A * t)}} \quad (14)$$

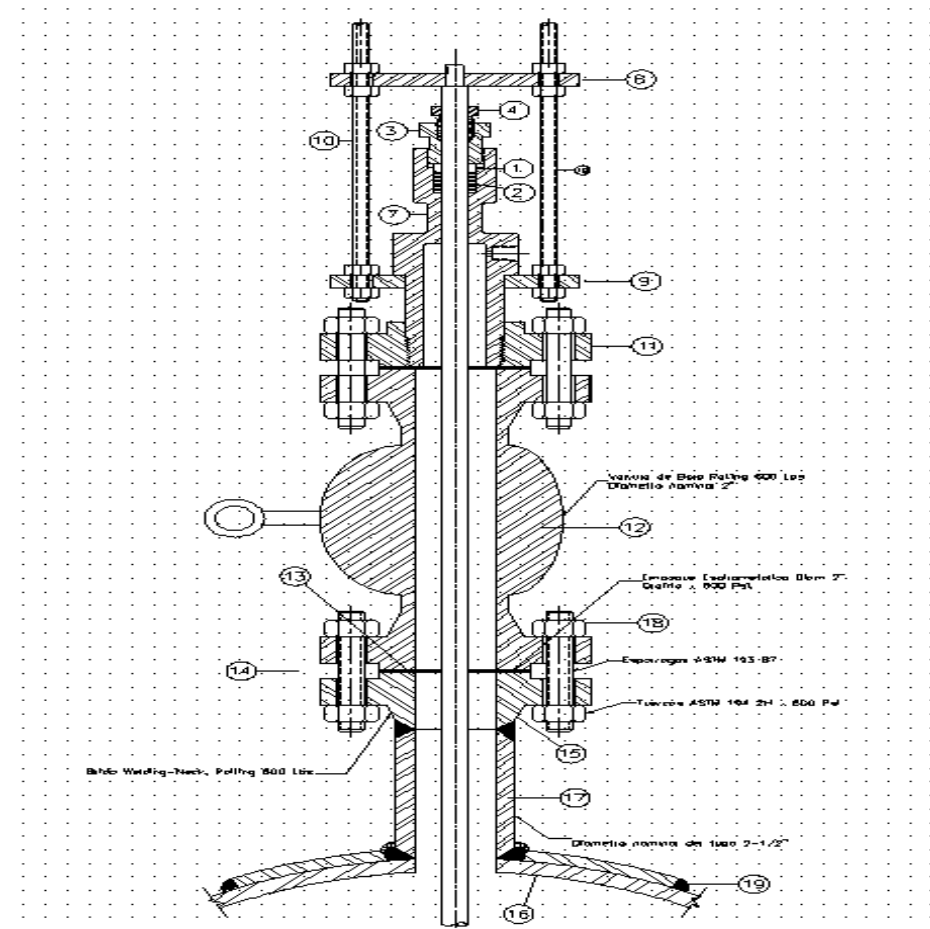
T, tiempo de exposición y K constante.

**FIGURA 34. Esquema de montaje para la colocación del retráctil sobre la línea de conducción de gas**



Fuente: John Faber Archila

**FIGURA 35. Esquema de montaje para la colocación del retráctil sobre la línea de conducción de gas**



ITEM	PIEZA
1	DISCO
2	SELLOS
3	TUERCA DE PRESION
4	TUERCA DE CONTRAPRESION
5 Y 6	SELLOS DE AJUSTE
7	CUERPO DEL RETRACTIL
8 Y 9	PLACA DE SEGURIDAD
10	ESPARRAGOS
12	VALVULA DE BOLA
13	EMPAQUE ESPIROMETALICO
14	ESPARRAGOS
15	BRIDA WELDING-NECK
16	LINEA DE CONDUCCION GAS
17	TUBERIA
18	TUERCAS
19	SOLDADURA

Fuente: John Faber Archila

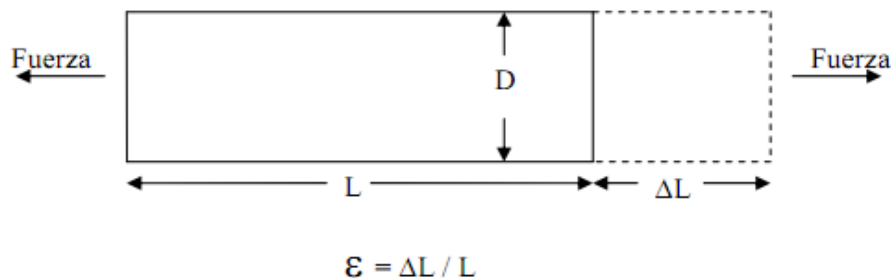
## 5. DISEÑO DEL SENSOR DE PESO

Los sensores de peso son elementos capaces de medir un cambio en sus propiedades físicas debido a la interacción con un cuerpo y expresarlo en forma de señal eléctrica, neumática entre otras. Existen diversos tipos de sensores de peso uno de los cuáles se detallan a continuación.

### 5.1 GALGAS EXTENSOMÉTRICAS.

**5.1.1 Definición de Galga Extensométrica.** Una galga extensométrica o “strain gage” (en inglés), es un dispositivo transductor universal que se utiliza para la medición electrónica de diversas magnitudes mecánicas, como pueden ser; la presión, carga, torque, deformación, posición, etc. Se entiende por strain o esfuerzo, a la cantidad de deformación de un cuerpo debida a la fuerza aplicada sobre él. Si se lo pone en términos matemáticos, strain ( $\epsilon$ ) se define como la fracción de cambio en longitud, como de demuestra la figura 35.

FIGURA 36. Definición de Galga Extensométrica.



El parámetro strain puede ser positivo (tensión) o negativo (compresión); este valor es adimensional. En la práctica, la magnitud de medida de una galga es muy pequeña por lo que usualmente se expresa como microstrain ( $\mu\epsilon$ ), que es  $\epsilon \times 10^{-6}$ .

Cuando una barra es tensionada por una fuerza uniaxial, un fenómeno conocido como esfuerzo de Poisson causa que la circunferencia de la barra se contraiga en la dirección transversal o perpendicular. La magnitud de esta contracción transversal es una propiedad del material indicado por su coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

**5.1.2 Relación de Poisson.** La relación de Poisson  $\nu$  del material, proporciona una medida del estrechamiento de sección de un material elástico cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la del estiramiento. Es definido como el ratio negativo del esfuerzo en la dirección transversal (perpendicular a la fuerza) al esfuerzo en la dirección axial (paralelo a la fuerza) como en la siguiente ecuación:

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{\text{transversal}}}{\varepsilon_{\text{longitudinal}}} \quad (15)$$

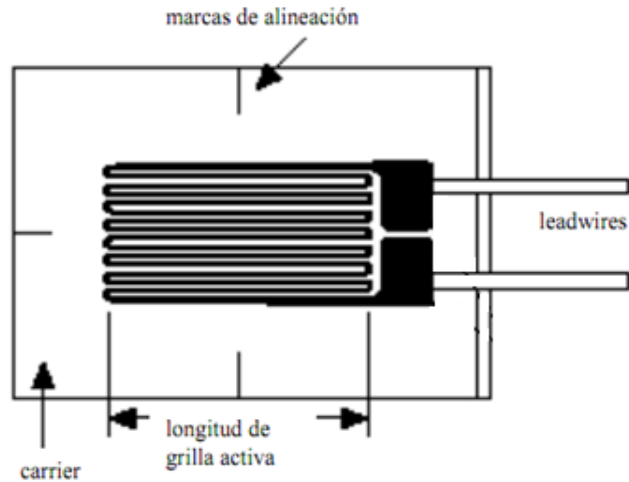
Como ejemplo, la relación de Poisson del acero está entre 0.25 a 0.3.

Se conocen varios métodos para medir el esfuerzo, pero el más utilizado es mediante una galga extensométrica, dispositivo cuya resistencia eléctrica varía de forma proporcional al esfuerzo a que éste es sometido. Este transductor es ampliamente utilizado, y es el que se utiliza en este proyecto.

**5.1.3 Principio de Funcionamiento de una galga extensiométricas.** La galga extensométrica metálica consiste en un cable muy fino o papel de aluminio dispuesto en forma de grilla. Esta grilla, maximiza la cantidad de metal sujeto al esfuerzo en la dirección paralela, figura 36. La grilla está pegada a un fino respaldo llamado “carrier”, el cual está sujeto directamente a la pieza bajo medida.

Por lo tanto, el esfuerzo experimentado por la pieza es transferido directamente al strain gage, el cual responde con cambios lineales de resistencia eléctrica.

**FIGURA 37. Galga Extensométrica Metálica.**



Es de suma importancia que las galgas sean apropiadamente montadas sobre la pieza metálica o sobre la celda de carga para que el esfuerzo sea transferido adecuadamente desde la pieza a través del adhesivo y el material de respaldo hasta la misma grilla metálica.

**5.1.4 Factor de Galga.** Existe un parámetro fundamental entre las características de las galgas extensométricas, que es la sensibilidad de elongación o llamado simplemente factor de galga ( $G$ ). El factor de galga es definido como la relación de variación fraccional de resistencia eléctrica y la variación fraccional de longitud, como se describe en la siguiente ecuación:

$$G = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (16)$$

El factor de galga (G) de un conductor metálico depende en gran parte de las características de la aleación en particular: trabajo en frío, nivel de impurezas en la aleación y el rango de deformaciones sobre el cual se mide.

El factor de galga típico para un galga extensométrica metálica es de aproximadamente 2. A continuación se muestra una tabla con las siguientes sensibilidades de aleaciones comunes utilizadas en galgas extensométrica.

**Tabla 1.1 Factores de Galgas Comunes.**

<b>Sensibilidad a la deformación ( G ) de aleaciones comunes utilizadas en galgas extensométricas.</b>		
<b>Material</b>	<b>Composición %</b>	<b>G</b>
Advance o Constantan	45 Ni, 55 Cu	2,1
Nichrome V	80 Ni, 20 Cr	2,2
Isoelastic	36 Ni, 8 Cr, 0.5 Mo, 55.5 Fe	3,6
Karma	74 Ni, 20 Cr, 3 Al, 3 Fe	2,0
Armour D	70 Fe, 20 Cr, 10 Al	2,0
Alloy 479	92 Pt, 8 W	4,1

**5.1.5 Efectos de la Temperatura.** Una galga extensométrica tiende a sufrir variaciones de resistencia debidas a efectos térmicos sobre la propia galga y dilataciones del material sobre el que está situada. Estas dilataciones del material pueden alcanzar fácilmente los órdenes de magnitud de la deformación a medir. Una posible solución de este problema consiste en utilizar una galga idéntica a la de medida, que, colocada sobre un trozo del mismo material sometido a las mismas variaciones de temperatura permite, mediante una conexión adecuada de ambas galgas, eliminar la componente debida a la variación de temperatura.

La resistencia de la galga puede cambiar por efecto térmico, lo que introduce error en la medición.

**5.1.6 Clasificación.** Existen dos clases básicas de galgas extensiométricas: Galgas metálicas o de hilo conductor y Galga semiconductor. Las aleaciones metálicas tienen la ventaja de un bajo coeficiente de temperatura. Para la elección de un determinado tipo de galga se debe considerar algunos factores como el tipo de información que se va obtener de las mediciones, material y lugar sobre el cual se va a medir.

**5.1.6.1 Galgas Metálicas:** Estas galgas están constituidas básicamente por un conductor de sección circular, soportado por una fina lámina de material aislante. Los materiales más usados para este tipo de galgas son el constantan, que es una aleación de cobre (55%) y níquel (45%); y el nicrom, aleación de Ni (80%) y Cr (20%), que ofrece un margen de compensación de temperatura como se señaló antes. Por lo que respecta al material aislante de soporte, este se realiza con materiales tipo nylon, vinilo, polietileno o teflón.

Existe una segunda topología muy utilizada hoy en la actualidad de bandas extensiométricas metálicas, que están basadas en la tecnología de trama pelicular. Esta consiste en una película de metal de 20-30 micras de grosor, realizada con los mismos procesos de fabricación de los circuitos impresos. Sus ventajas respecto a las galgas de filamento son las siguientes:

- Optimización del diseño de la galga y reducción dimensional.
- Mayor superficie de evacuación térmica.
- Reducción del error.

En general, las galgas metálicas ofrecen una resistencia eléctrica de entre 100 – 5000 ohm y un factor de galga que varía entre 2 para las aleaciones descritas y 4 para aleación de platino y tungsteno.

**5.1.6.2 Galgas Semiconductoras:** Las galgas semiconductoras son muy similares a las galgas metálicas. En este tipo de galgas se sustituye el hilo metálico por un material semiconductor. La principal diferencia constructiva de estas galgas respecto a las anteriores se encuentra en el tamaño; las galgas semiconductoras tienen un tamaño más reducido. El cambio en la resistencia de un material debido a la aplicación de un esfuerzo es llamado efecto piezorresistivo. Los piezorresistores son fáciles de fabricar en silicio. Para lograrlo, sólo se introducen impurezas (tipo n ó tipo p) en un pequeño volumen del silicio.

Sus ventajas principales consisten en la facilidad de instalación, alta sensibilidad y alta resistencia a la fatiga. Su principal inconveniente radica en su respuesta no lineal y la alta dependencia del factor de galga con la temperatura, en relación inversamente proporcional.

Las galgas semiconductoras tienen una resistencia eléctrica entre 1k – 5k ohm y un factor de galga que varía entre 50 - 200.

**5.1.6.3 Características de las Galgas:** Las principales características de las galgas son las siguientes:

- **Ancho y Longitud:** Dichos parámetros proporcionan las características constructivas de la galga. Esto permite escoger el tamaño del sensor que más se adecue a nuestras necesidades.

- **Peso:** Esta característica define el peso de la galga. Este suele ser del orden de gramos. En aplicaciones de mucha precisión el peso puede influir en la medida de la deformación.
- **Tensión medible:** Es el rango de variación de longitud de la galga, cuando ésta se somete a una deformación. Este rango viene expresado en un tanto por cien respecto a la longitud de la galga.
- **Temperatura de funcionamiento:** Es aquella temperatura para la cual el funcionamiento de la galga se encuentra dentro de los parámetros proporcionados por el fabricante.
- **Resistencia de la galga:** Es la resistencia de la galga cuando esta no está sometida a ninguna deformación. Es la resistencia de referencia y suele acompañarse de un porcentaje de variación.
- **Factor de galga:** Factor de galga o factor de sensibilidad de la galga es una constante  $K$  característica de cada galga. Determina su sensibilidad.
- Este factor es función de muchos parámetros, pero especialmente de la aleación empleada en la fabricación.
- **Efectos de la Temperatura.** Una galga extensométrica tiende a sufrir variaciones de resistencia debidas a efectos térmicos sobre la propia galga y dilataciones del material sobre el que está situada. Estas dilataciones del material pueden alcanzar fácilmente los órdenes de magnitud de la deformación a medir. Una posible solución de este problema consiste en utilizar una galga idéntica a la de medida, que, colocada sobre un trozo del mismo material sometido a las mismas variaciones de temperatura permite, mediante una

conexión adecuada de ambas galgas, eliminar la componente debida a la variación de temperatura.

La resistencia de la galga puede cambiar por efecto térmico, lo que introduce error en la medición.

#### **5.1.6.4 Ventajas.**

- Pequeño tamaño
- Pueden ser alimentadas con corriente continua o corriente alterna
- Tienen una excelente respuesta en frecuencia
- Pueden utilizarse para medidas estáticas y dinámicas
- Compensación de temperatura relativamente fácil
- No son influidas por los campos magnéticos

#### **5.1.6.5 Desventajas**

- Señal de salida débil
- Pequeño movimiento de la galga
- Alta sensibilidad a las vibraciones
- Estabilidad dudosa a lo largo del tiempo (el envejecimiento de los adhesivos puede afectar a su funcionamiento).
- Para umbrales pequeños la técnica de construcción es cara

#### **5.1.6.6 Limitaciones.**

- El esfuerzo aplicado no debe llevar a la galga fuera del margen elástico
- Se necesita una buena adhesión al objeto, para que la medida de la deformación sea correcta.

- Un incremento en la temperatura tiene como consecuencia una variación de la resistencia aún sin aplicar ningún esfuerzo.
- Coeficiente de dilatación de la galga parecido al del soporte para evitar tensiones mecánicas.
- Auto calentamiento de la galga por la disipación de potencia de alimentación.

**5.1.6.7 Clasificación:** Existen dos clases básicas de galgas extensométricas: Galgas metálicas o de hilo conductor y Galga semiconductor. Las aleaciones metálicas tienen la ventaja de un bajo coeficiente de temperatura. Para la elección de un determinado tipo de galga se debe considerar algunos factores como el tipo de información que se va obtener de las mediciones, material y lugar sobre el cual se va a medir.

Existe una segunda topología muy utilizada hoy en la actualidad de bandas extensiométricas metálicas, que están basadas en la tecnología de trama pelicular. Esta consiste en una película de metal de 20-30 micras de grosor, realizada con los mismos procesos de fabricación de los circuitos impresos.

Sus ventajas respecto a las galgas de filamento son las siguientes:

- Optimización del diseño de la galga y reducción dimensional.
- Mayor superficie de evacuación térmica.
- Reducción del error.

En general, las galgas metálicas ofrecen una resistencia eléctrica de entre 100 – 5000 ohm y un factor de galga que varía entre 2 para las aleaciones descritas y 4 para aleación de platino y tungsteno.

- **Coeficiente de temperatura del factor de galga:** La temperatura influye notablemente en las características. A su vez, cualquier variación en estas

características influye en el factor de galga. Este coeficiente se mide  $\%/^{\circ}\text{C}$ , que es la variación porcentual del valor nominal del factor de galga respecto al incremento de temperatura.

- **Prueba de fatiga:** Esta característica indica el número de contracciones o deformaciones a una determinada tensión que puede soportar la galga sin romperse.
- **Material de la lámina:** Esta característica define el material del que está hecho el hilo conductor o el material semiconductor.
- **Material de la base:** Esta característica define el material del que está constituida la base no conductora de la galga.
- **Factor de expansión lineal:** Representa un error que se produce en la magnitud de salida en ausencia de señal de entrada, es decir, en ausencia de deformación.

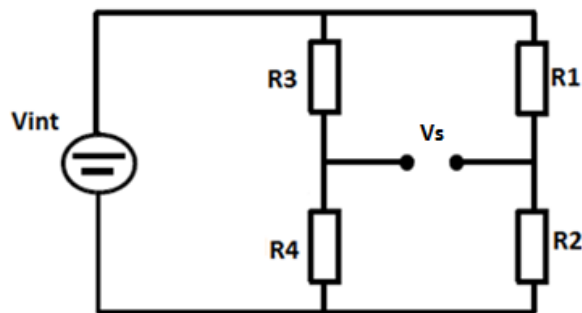
Este error depende de la temperatura ambiente a la que está sometida la galga.

## 5.2 CIRCUITO DE MEDIDA DE LAS GALGAS

La medición de las galgas extensométricas es un caso especial de medición de la variación que tienen en su resistencia. Se requiere utilizar un puente resistivo para poder medir los pequeños cambios en su resistencia para ello se utiliza el puente de Wheatstone, inventado por el físico inglés Charles Wheatstone en 1843. La medición en el puente se ve afectada por los cambios en el voltaje de excitación. Para mediciones de larga duración, donde el valor de los componentes puede variar con el tiempo o con los cambios de temperatura, se requiere de calibraciones periódicas.

**5.2.1 Puente de Wheatstone.** El puente de Wheatstone es básicamente un arreglo de cuatro resistencias y se utiliza para medir pequeños cambios de resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Las galgas extensométricas pueden ocupar uno, dos o cuatro brazos del puente, completando con resistencias fijas los brazos que sobran. De acuerdo a esto se las ha clasificado en tres tipos de montaje básicos.

**FIGURA 38. Puente de Wheatstone.**



La medida se suele realizar por deflexión, es decir midiendo la diferencia de tensión existente entre los terminales de salida del sensor. Para este estudio se utiliza el de medio puente con dos galgas el cual se muestra en la figura 39. El valor de la salida  $V_s$  es la diferencia entre los dos divisores de tensión, como se muestra en la ecuación:

$$V_s = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{int} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{int} \quad (17)$$

$V_s$  será nulo si  $R_1/R_2 = R_3/R_4$ . También sucede esto en el caso de que sean  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ . En el caso de las galgas extensométricas, aunque los valores de resistencia son muy parecidos entre sí, no son rigurosamente iguales, con lo cual se tiene  $V_s$  de valor pequeño.

Si las resistencias varían (siendo inicialmente aproximadamente iguales entre sí), variará también la tensión de salida  $V_s$ . Se tiene, por tanto un diferencial del voltaje:

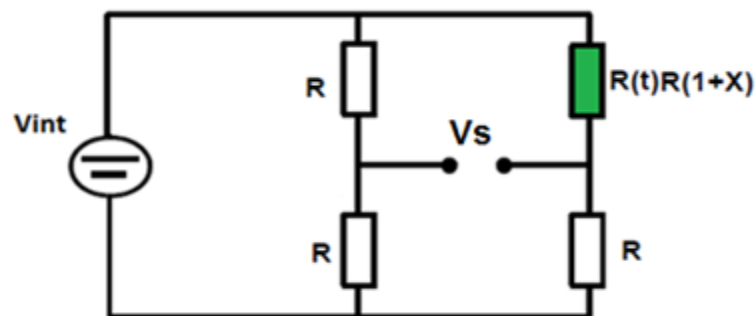
$$\Delta V_s = V_{int} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (18)$$

$\Delta V_s$  será la variación de la tensión de salida del puente al variar en  $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3$  y  $\Delta R_4$  las galgas  $R_1, R_2, R_3$  y  $R_4$ , respectivamente.

**5.2.2 Diferentes Montajes de Puente.** Lo más usual en el análisis de tensiones es emplear una sola galga para realizar la medida, pudiéndose recurrir o no a una galga de compensación. A continuación se describen en detalle algunos de los diversos montajes usualmente empleados

**5.2.3 Puente de medida con una galga.** La configuración mostrada en la figura 1.5 es de un cuarto de puente. En esta configuración se emplea una sola galga. Presenta un comportamiento lineal, únicamente para deformaciones pequeñas, por lo que sólo se usa cuando los rangos de deformaciones son pequeños.

FIGURA 39. Puente con una Galga.



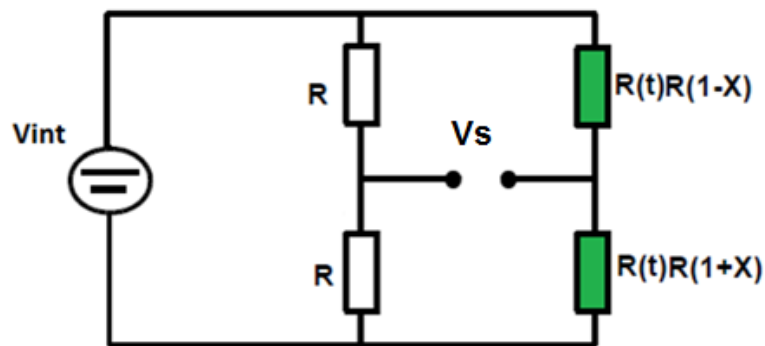
Este puente de medida se caracteriza por una baja sensibilidad. Y está afectado por la temperatura debido a que solo hay una galga en el circuito.

**5.2.4 Puente de medida con dos galgas.** En esta configuración se emplean dos galgas activas. Existen dos casos principales que se pueden presentar para esta configuración. El primer caso es cuando ambas galgas presentan deformaciones opuestas, el cual presenta una respuesta lineal.

El segundo caso, cuando ambas galgas presentan deformaciones iguales.

La configuración de la figura 39 es llamado también de medio puente.

**FIGURA 40. Puente con Dos Galgas.**

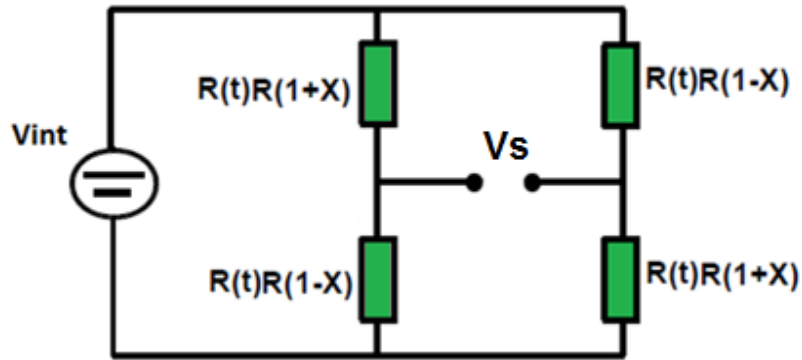


Debido a la utilización de dos galgas, se consigue duplicar la sensibilidad del puente respecto al anterior. Esto permite que para una misma deformación, se tenga una mayor señal de salida, para una tensión de alimentación dada.

La disposición de las galgas, permite la compensación en temperatura.

**5.2.5 Puente de medida con cuatro galgas.** La configuración que se muestra en la figura 40, de puente completo, en este puente se emplea cuatro galgas activas, donde las galgas pueden ser iguales o únicamente por parejas. En este montaje se presenta un comportamiento lineal. Además, este montaje presenta el doble de sensibilidad que el de 1/2 puente y cuatro veces más que el de 1/4 puente. En el siguiente circuito las galgas están compensadas en temperatura.

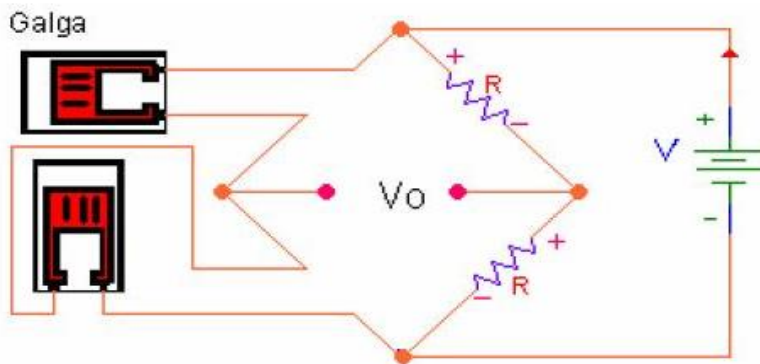
FIGURA 41. Puente con Cuatro Galgas.



### 5.3 CONFIGURACIÓN DE MEDIO PUENTE.

Esta configuración se ilustra en la figura 41., posee un voltaje a la salida que es línea y dobla aproximadamente la salida del circuito del cuarto puente, aquí ambas galgas están activas solo que la segunda galga se coloca transversalmente a la primera galga. Para que esta configuración funcione adecuadamente, la resistencia de una galga debe incrementarse mientras que la de la otra debe disminuir.

FIGURA 42. Configuración de medio puente.



La variación de la resistencia de la galga colocada en la dirección de aplicación de la fuerza está dada por  $R + dR$ , y para la otra galga que detecta la variación de la sección de la barra (efecto Poisson) es  $R - \nu dR$ .

## 5.4 DISEÑO DEL CIRCUITO

El diseño del circuito se lo realiza por etapas; para ello se necesita conocer el tipo de señal proveniente del puente. Esta señal se encuentra en el rango de los milivoltios, por el cual se tendrá que amplificar esta señal y para ello se necesitará un amplificador de instrumentación. Luego esta señal se la digitaliza por medio de un microcontrolador

Las etapas más importantes en el acondicionamiento de la señal son las siguientes:

- Excitación.
- Filtrado.
- Amplificación.
- Linealización.
- Digitalización.

Muchos transductores requieren de una fuente de alimentación. La señal de estos transductores puede ser voltaje o corriente. Los fabricantes de galgas extensométricas, recomiendan que el valor con el cual se excite, fluctúe entre +5 V y +15 V, ya sea éste un voltaje continuo o alterno.

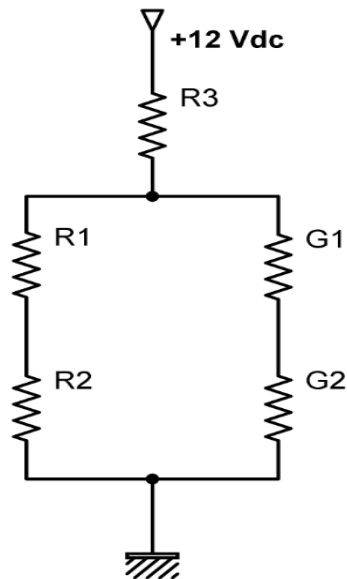
El voltaje tomado en este circuito para alimentar el puente es de +12Vdc.

Es muy factible utilizar este tipo de fuente, ya que en este circuito además de la alimentación de las galgas, también se ocuparán otros voltajes para alimentar el circuito.

**5.4.1 Excitación.** Muchos transductores requieren de una fuente de alimentación. La señal de estos transductores puede ser voltaje o corriente. Muchos se alimentan con voltajes de DC pequeños que pueden variar entre +5 V y +15V.

Los fabricantes de galgas extensométrica, recomiendan que el valor con el cual se excite, fluctúe entre +5 V y +15 V, en el siguiente circuito el voltaje para alimentar el circuito es de +12Vdc.

**FIGURA 43. Alimentación del puente de Wheatstone**



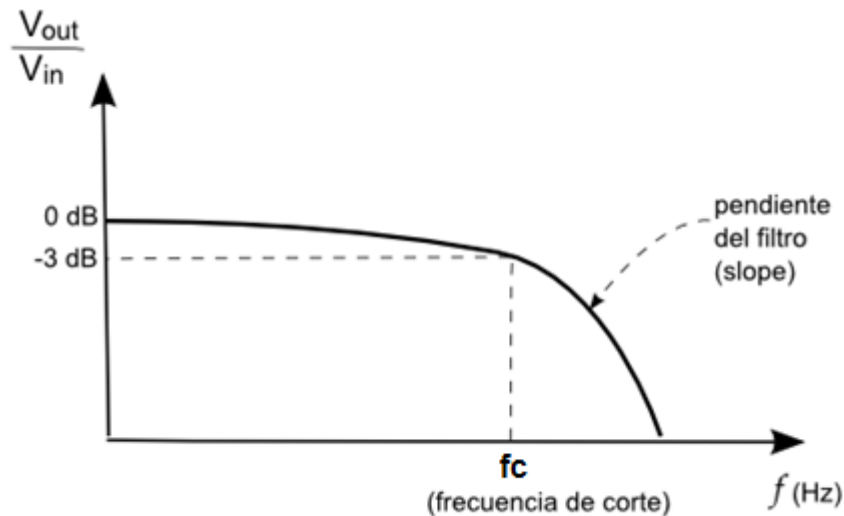
En algunos casos el voltaje recomendado es de +10 Voltios continuos para este tipo de sensores. Mientras mayor sea el voltaje de excitación mayor será el rango de salida a plena carga. Mientras es mayor el voltaje, también puede causar error debido a un sobrecalentamiento ya que depende de la relación mV/V de la celda.

**5.4.2 Filtrado.** El propósito del filtrado es eliminar señales no deseadas que están afectando la señal que se trata de medir. Como el voltaje diferencial del puente resistivo es una señal muy pequeña (mV), a la salida se debe procurar tener un filtro antes de ser amplificada dicha señal.

Señales de AC, tales como vibración, requieren de otro tipo de filtrado, conocido como antialiasing. Para ello es utilizado también un filtro pasa bajo,

**5.4.2.1 Filtro Pasa Bajo.** Se trata de un filtro que permite el paso de las frecuencias inferiores a una frecuencia conocida, llamada frecuencia central ( $f_c$ ), atenuando enormemente las frecuencias superiores a dicha frecuencia.

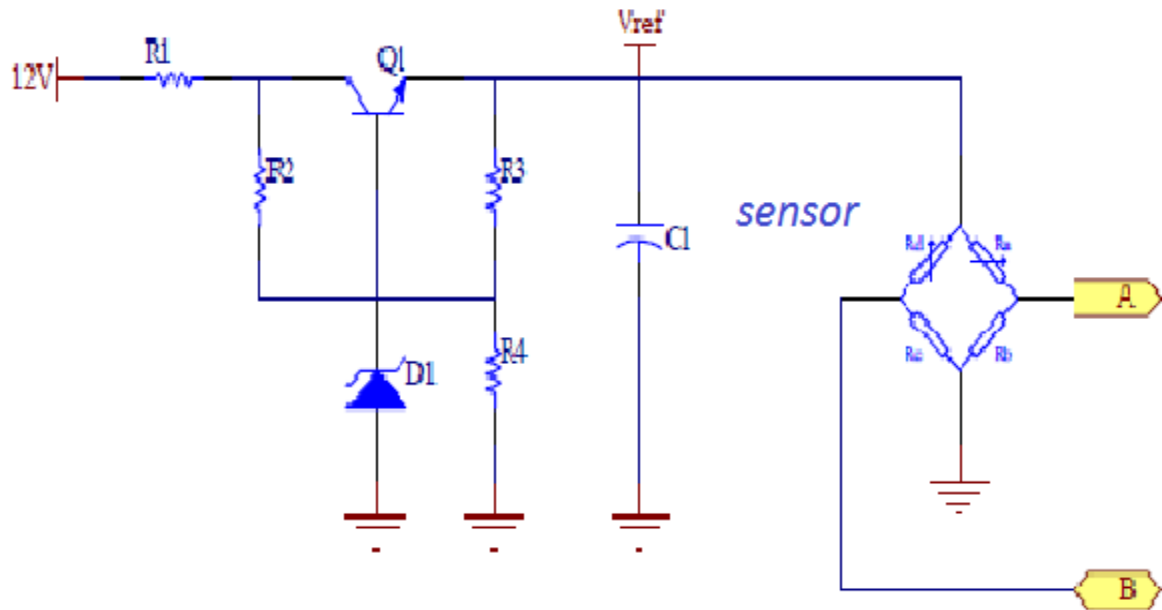
**FIGURA 44. Respuesta de Frecuencia de los Filtros Pasa Bajos.**



**5.4.3 Regulación de la fuente de alimentación.** Una fuente regulada de tensión utiliza una realimentación negativa que detecta de un modo instantáneo las variaciones de tensión de salida, actuando como control que las corrige automáticamente. La regulación puede ser en paralelo o en serie. En la regulación en paralelo el control trabaja en corriente en tanto que la regulación en serie lo hace en tensión.

La primera etapa de acondicionamiento del sensor de peso es una fuente regulada de voltaje en serie (figura 44) para conseguir que la tensión continua de alimentación de la celda de carga sea lo más constante posible.

FIGURA 45. Circuito de la fuente estabilizada



El transistor Q1 constituye el elemento de control que interpreta la señal de error y corrige las variaciones de la tensión de referencia de la celda  $V_{ref}$ . Si el voltaje de entrada aumenta, la corriente de colector  $i_C$  también lo hace y la corriente de base  $I_b$  disminuirá, con lo que el transistor conducirá menos, aumentando el voltaje colector-emisor  $V_{CE}$ . De esta forma un aumento del voltaje de ingreso es absorbido entre colector y emisor, manteniéndose de ese modo  $V_{ref}$  constante. Un aumento de la corriente de carga en cambio producirá una disminución del  $V_{ref}$  y el circuito reaccionará de manera que  $i_C$  disminuirá, por lo tanto aumentará  $I_b$  con lo que el transistor conducirá más, disminuyendo el  $V_{CE}$ . De esta manera, variaciones de la carga son compensadas por el circuito.

De la figura 44. Se tiene.

$$mVs = \frac{R4}{R3 + R4} Vs \quad (19)$$

$$R3 = \frac{R4(Vs - mVs)}{mVs} \quad (20)$$

$$V_S = \frac{(R3 + R4)}{R4} mV_S \quad (21)$$

Se requiere que la tensión de entrada sea bastante mayor que la de salida deseada por lo que el voltaje de ingreso es de 12V, y para obtener una tensión de base constante y que permita tener constante el voltaje (tensión) de salida se utilizó un diodo

Para evitar oscilaciones de la fuente<sup>2</sup> se conecta en paralelo con la salida un condensador de 1µF que cortocircuitará las componentes de alta frecuencia debidas a la oscilación.

**5.4.4 Amplificación.** La salida diferencial del puente resistivo, como ya se dijo, es una señal relativamente pequeña. En la práctica, la mayoría de los puentes con galgas y transductores de presión tienen salidas menores de 10 mV/V (10 mV de salida por voltio del voltaje de excitación). Con un voltaje de excitación de 10 V, la señal de salida será de 1000mV. Por este motivo la señal tiene que ser amplificada.

En circuitos donde se encuentren estos transductores, se implementan amplificadores para aumentar el nivel de la señal, para incrementar la resolución de la medición y mejorar las relaciones de señal a ruido; uno de ellos es el amplificador de instrumentación.

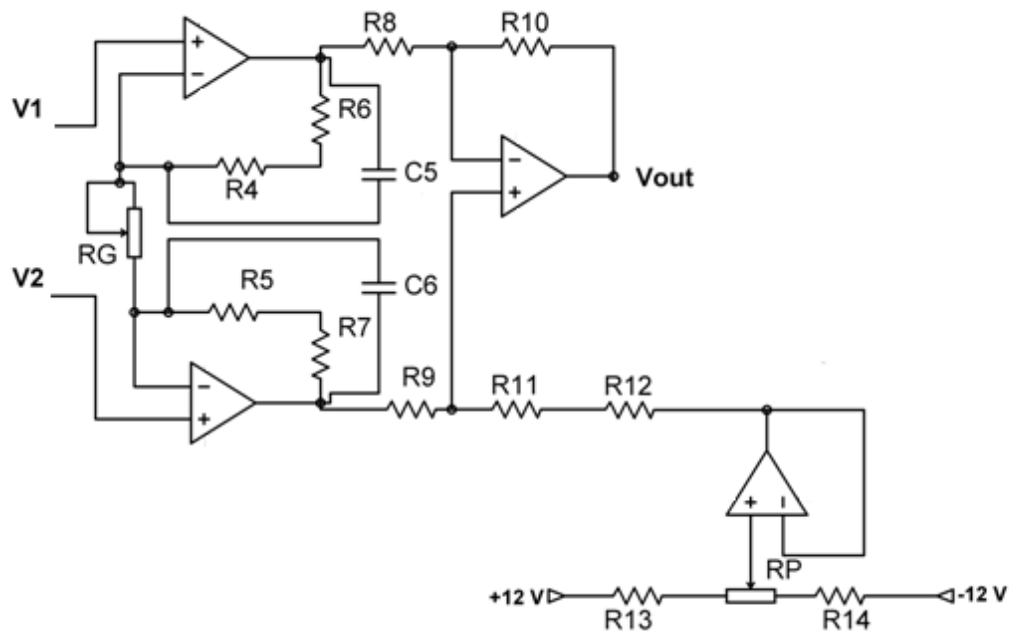
**5.4.4.1 Amplificador de Instrumentación.** La exigencia cada vez de medir señales muy pequeñas de ciertos transductores, nos ha llevado a implementar un buen sistema de amplificación para este tipo de señales. Una de las mejores

---

<sup>2</sup> La fuente oscila cuando la realimentación que en continua es negativa, se convierte en positiva para alguna frecuencia, generalmente muy alta.

opciones es utilizar un Amplificador de Instrumentación con una adecuada Relación de Rechazo al Modo Común (CMRR).

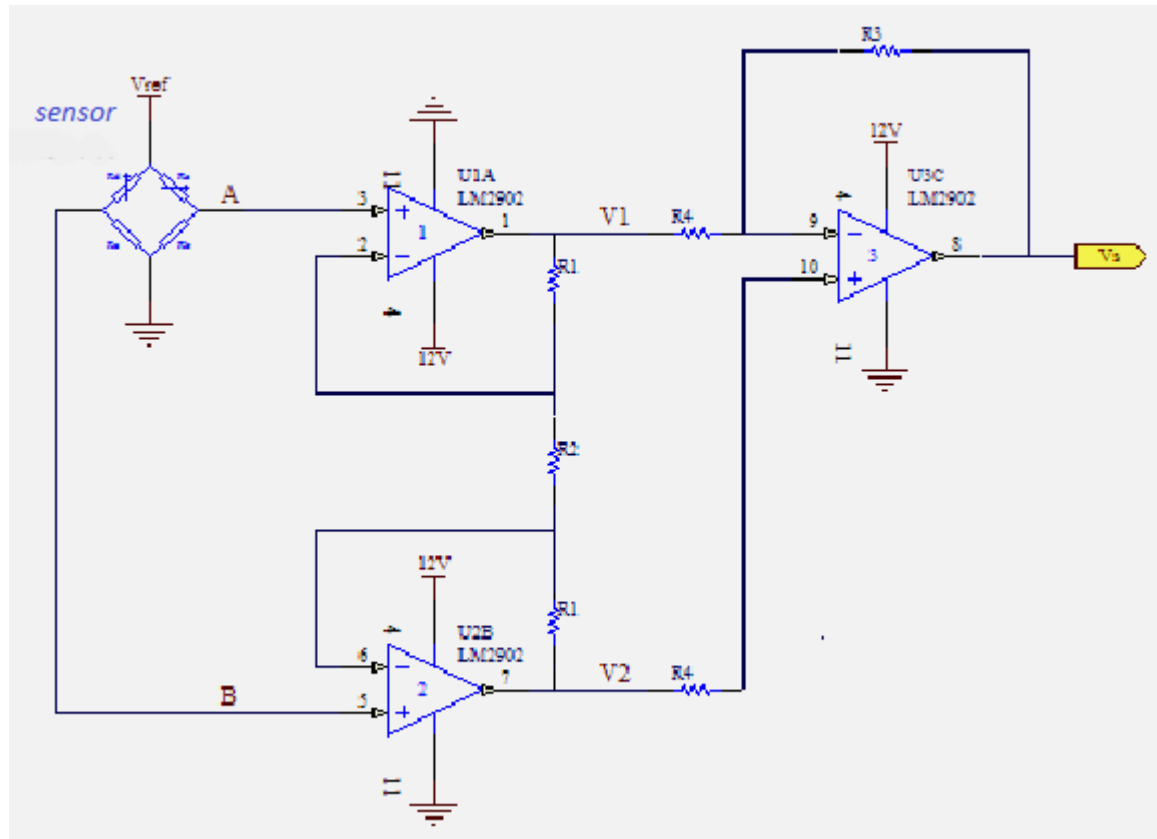
**FIGURA 46. Amplificador de Instrumentación.**



La figura 45. Muestra el circuito del amplificador de instrumentación que es aplicado a la tarjeta acondicionadora de señal.

El voltaje diferencial de la celda de peso es elevado por el amplificador de instrumentación con entrada diferencial de la figura 46. El amplificador operacional utilizado en este circuito es el CI LM2902 que es un encapsulado con cuatro amplificadores operacionales y necesita una alimentación de 3 a 26V.

FIGURA 47. Circuito de amplificador instrumental



Refiriéndonos a la figura 46, los voltajes de salida de cada amplificador dependen de las resistencias R1 y R2.

$$V1 = V2 - \left(\frac{R1}{R2}\right)(VA - VB) \quad (22)$$

$$V2 = V1 + \left(\frac{R1}{R2}\right)(VA - VB) \quad (23)$$

La etapa de salida es un amplificador diferencial

$$V_o = \frac{R_3}{R_4} (V_2 - V_1) \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (24)$$

$$V_o = \frac{R_3}{R_4} \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_2}\right) (V_B - V_A) \quad (25)$$

En la ecuación de voltaje de salida la que determina la ganancia son las resistencias

$$G = \frac{R_3}{R_4} \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (26)$$

## 5.5 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.

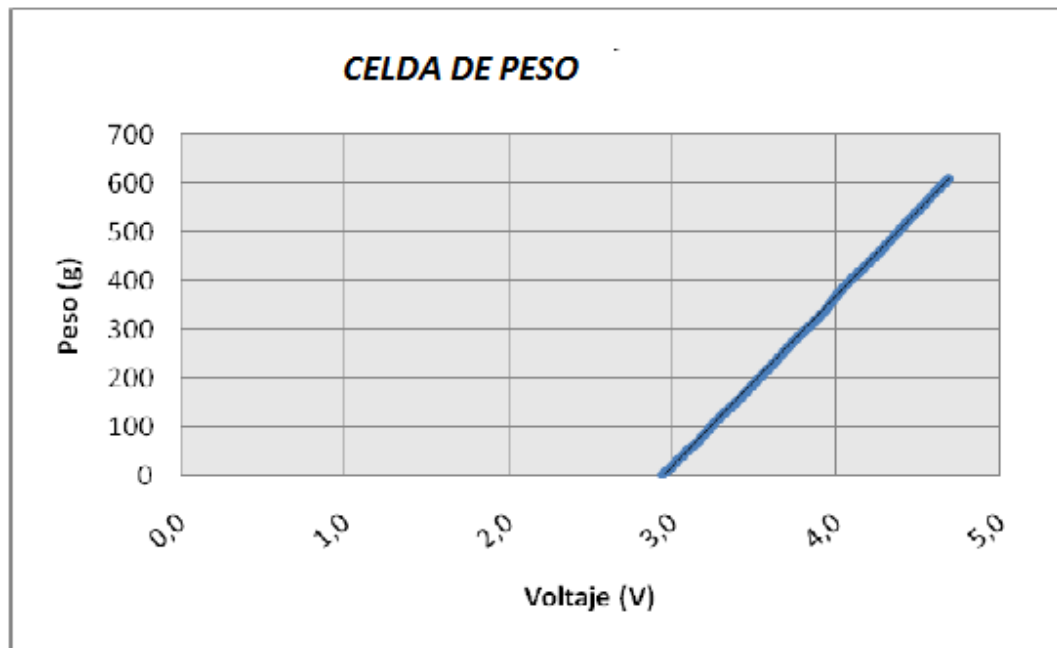
La tensión o compresión a la que el peso somete a la celda de carga hace variar la longitud del hilo metálico y modifica por lo tanto su resistencia eléctrica". Esta variación de resistencia se refleja a la salida de la celda de carga como una señal analógica de voltaje generalmente expresada en el orden de los milivoltios.

El montaje utilizado para obtener la señal correspondiente a la deformación de la galga extensométrica con una configuración de puente doble de Wheatstone.

**5.5.1 Calibración de las celdas de carga.** Esta prueba consistió en encontrar la curva de funcionamiento de las celdas de carga mediante la colocación de diversos pesos referidos a un patrón

El resultado final es la curva que muestra la relación entre peso y voltaje para cada una de las celdas de carga como se puede observar desde la Figura 48.

FIGURA 48. Curva de funcionamiento de la celda de peso



Para obtener una relación entre el peso y la señal de salida de la celda de carga, teniendo en cuenta que la salida del sensor es lineal, se considera que:

Capacidad [kg]       $\longrightarrow$       Señal máxima [mV]

Carga [kg]       $\longrightarrow$       Salida [mV]

Aplicando una regla de tres simple se llega a la Ecuación

$$carga = \frac{capacidad * salida}{señal\ maxima} \quad (27)$$

El cálculo de la velocidad de corrosión se realiza de acuerdo a la siguiente fórmula:

El valor teórico de la señal máxima que nos entregue la celda de carga es de:

$$\text{Señal Máx.} = \text{Sensitividad} \times \text{Voltaje Excitación}$$

La sensibilidad depende del voltaje que alimenta al sensor, nuestro valor teórico de la sensibilidad es de 1.5mV.

La señal de salida de la celda de carga para cualquier carga está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Señal}(v) = \text{Sensitividad} * \text{voltaje de excitacion} * \frac{\text{Carga}[g]}{\text{Capacidad celda}[Kg]} \quad [7] \quad (28)$$

Los límites de la celda de carga están dados por carga y ruptura; éstos obedecen al comportamiento de la celda de carga misma

**Tabla1.2. Relación de peso Vs voltaje Celda de Carga..**

Peso	Voltaje	Peso Calculado	Error(%)	Peso	Voltaje	Peso Calculado	Error(%)
10	0,11	9,329	-6,709	210	2,42	210,830	0,395
20	0,23	19,534	-2,330	220	2,54	221,590	0,723
30	0,35	29,768	-0,775	230	2,63	229,678	-0,140
40	0,46	39,174	-2,066	240	2,76	241,390	0,579
50	0,58	49,462	-1,075	250	2,85	249,518	-0,193
60	0,69	58,919	-1,802	260	2,97	260,380	0,146
70	0,81	69,263	-1,053	270	3,07	269,454	-0,202
80	0,92	78,770	-1,537	280	3,18	279,458	-0,193
90	1,04	89,170	-0,923	290	3,29	289,487	-0,177
100	1,16	99,598	-0,402	300	3,40	299,540	-0,153
110	1,28	110,054	0,049	310	3,51	309,617	-0,124
120	1,39	119,665	-0,279	320	3,62	319,718	-0,088
130	1,51	130,177	0,136	330	3,74	330,766	0,232
140	1,62	139,838	-0,115	340	3,85	340,918	0,270
150	1,73	149,524	-0,317	350	3,95	350,168	0,048
160	1,84	159,234	-0,479	360	4,07	361,294	0,359
170	1,95	168,968	-0,607	370	4,18	371,518	0,410
180	2,07	179,614	-0,215	380	4,30	382,700	0,711
190	2,19	190,289	0,152	390	4,40	392,040	0,523
200	2,30	200,100	0,050	400	4,51	402,337	0,584

En la tabla 1.2 datos tomados de una balanza mecánica y una celda carga utilizando la formula anterior [7]

Las mediciones se simularon con se realizaron con una balanza de aquí se encuentra el peso en gramos y el peso calculado con su respectivo voltaje. El peso calculado se lo obtiene de la ecuación matemática, anterior y con diferentes cargas.

**5.5.2 Especificaciones de la celda de carga.** La celda de peso consta de un puente de Wheatstone de cuatro brazos y se reemplazan dos resistencias por el mismo número de galgas extensiométricas

Ensambladas con sus respectivos acondicionadores de voltaje y amplificadores operacionales. Para estas celdas de peso se le asegura una excelente precisión a largo plazo entre un rango de peso entre 10 g y 25 lbs.

Specifications of load cell:

Rated Output: 2 mV/V nominal

Excitation: 10 Vdc

Linearity:  $\pm 0.2\%$  FS

Hysteresis:  $\pm 0.1\%$  FS

Repeatability: 0.1% FS

Zero Balance: Better than 1% FS

Maximum Load (Safe Overload):

150% of rated capacity

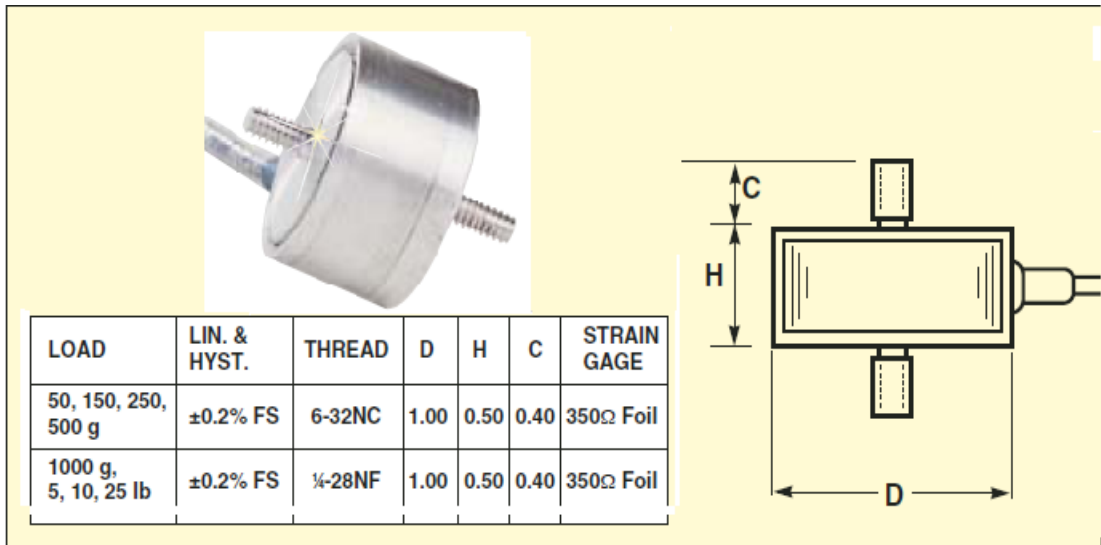
Ultimate Overload: 250% of rated capacity

Bridge Resistance: 350  $\Omega$

Compensated Temp Range:

9 to 66°C (15 to 150°F)

**FIGURA 49. Especificaciones de la celda de peso**



Fuente Datasheet load cell LCFA-5. Pdf.

**5.5.3 Montaje final del sistema de monitoreo.** El montaje para la técnica GRAVIMETRICA INSTRUMENTADA se realizó adecuando el Retráctil Figura 24; En donde la celda de peso es roscada sobre el extremo inferior del retráctil y a su vez unida al cupón gravimétrico o en su defecto al biocupon. La señal se toma de la parte superior del sistema. Figura 50.



**Tabla 1.3 Tabla Comparativa técnicas monitoreo de la corrosión por pérdida de peso**

<b>TÉCNICAS DE MONITOREO</b>	<b>MECANISMO</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>PRINCIPIO DE OPERACIÓN</b>
<b>RESISTENCIA ELÉCTRICA.(RE)</b>	<p>La técnica E/R mide el cambio en la resistencia eléctrica (Ohms) de un elemento metálico corroído expuesto al medio ambiente del proceso.</p> <p>La probeta se instala o retira empleando el retriever</p>	<p>La magnitud de la pérdida de metal puede ser medido en cualquier momento, a la frecuencia que sea requerida, mientras la probeta se encuentre in-situ y permanentemente expuesto a las condiciones del proceso.</p> <p>Pueden ser utilizados como disparador de alarmas.</p>	$R = \rho * \frac{L}{A}$ <p><math>\rho</math>, es la resistividad eléctrica intrínseca del material.</p> <p>L, es la longitud de la sección.</p> <p>A, es la zona de sección transversal</p>
<b>TÉCNICAS DE MONITOREO</b>	<b>APLICACIÓN</b>	<b>CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>RESISTENCIA ELÉCTRICA.(RE)</b>	<p>son aplicables en todos los ambientes de trabajo, líquidos, gaseosos, sólidos, flujos con partículas sólidas, además la tasa de corrosión puede ser obtenida de forma directa,</p>	<p>La velocidad de corrosión en milésimas de pulgadas por año (mpy) se obtiene al multiplicar el valor de la pendiente de la curva de en (mp) por 365 días:</p>	<p>vida útil de 1 año de servicio</p>

TÉCNICAS DE MONITOREO	MECANISMO	VENTAJAS	PRINCIPIO DE OPERACIÓN
<p><b>RESISTENCIA DE POLARIZACIÓN LINEAL (LPR)</b></p>	<p>Son Procesos de corrosión electroquímicos. Estos requieren de la presencia de un ánodo, un cátodo, un electrolito y un circuito para conectar el ánodo y el cátodo.</p> <p>Los instrumentos y probetas Corrosometer son básicamente cupones automáticos</p> <p>Las probetas comerciales están compuestas generalmente de 2 ó 3 electrodos, dependiendo de la conductividad del medio acuoso.</p>	<p>La principal ventaja de la polarización lineal es que es un método no destructivo</p> <p>permitiendo determinar la rapidez con la que se corroerá el metal o estimar la vida útil del mismo</p>	$i_{corr} = \frac{b_a b_c}{R_p (2.3 b_a + b_c)}$ <p>Donde: <math>i_{corr}</math> es la densidad de corriente de corrosión,</p> <p><math>R_p</math> es la resistencia a la polarización y <math>b_a</math> y <math>b_c</math> son constantes para el metal</p> <p>el valor división, este valor puede ser convertido en pérdida de metal, utilizando la siguiente formula:</p> $Metal\ loss\ (mils) = (División / 1000)^*$ <p>spam (7)</p> <p>El valor de spam es la vida útil de la probeta en mils, para n</p>
<p><b>TÉCNICAS DE MONITOREO</b></p>	<p><b>APLICACIÓN</b></p>	<p><b>CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN</b></p>	<p><b>DESVENTAJAS</b></p>
<p><b>RESISTENCIA DE POLARIZACIÓN LINEAL (LPR)</b></p>	<p>Esta sólo puede ser ejecutada exitosamente en medios acuosos electrolíticos. Las probetas LPR no funcionan en gases o emulsiones de agua/crudo, en donde los electrodos puedan asentarse depósitos o impurezas que les impidan actuar debidamente.</p> <p>No es recomendable para el fenómeno de corrosión-erosión</p>	$MPY = K1 * K2 * (Im / Ea)$ <p>La ecuación que relaciona la velocidad de corrosión en (MPY), el voltaje</p> <p>Aplicado (<math>E_a</math>) y la corriente medida (<math>I_m</math>) a causa de dicho voltaje es:</p>	<p>No es posible medir directamente desde los ánodos y cátodos que existen en las zonas adyacentes de la misma pieza del material.</p> <p>únicamente mide corrosión general, además de que resulta complicado obtener los datos para metales que presentan índices de corrosión bajos</p>

TÉCNICAS DE MONITOREO	MECANISMO	VENTAJAS	PRINCIPIO DE OPERACIÓN
<p><b>Cupones Gravimétricos</b></p> <p><b>O Gravimetría tradicional</b></p>	<p>El método de pérdida de peso relaciona el daño causado por la corrosión con pérdida de peso en los materiales y consisten en exponer piezas pequeñas de metal a ambientes corrosivos, para determinar la pérdida de peso del material después de la pruebas (NACE, 1984).</p> <p>Los cupones son piezas simples de metal elaborados a partir del material del sistema que va a ser evaluado, y que presenta por tanto las mismas características de corrosividad.</p>	<p>La técnica es aplicable a todos los ambientes (gases, líquidos y flujos con partículas sólidas).</p> <p>Puede realizarse inspección visual.</p> <p>Los depósitos de incrustación pueden ser observados y analizados</p> <p>La pérdida de peso puede ser fácilmente determinada y la tasa de corrosión puede ser fácilmente calculada</p> <p>La corrosión localizada puede ser identificada y medida</p> <p>La eficiencia de los inhibidores puede ser fácilmente determinada.</p>	<p>Es el tipo de prueba más común, el procedimiento de evaluación consiste en exponer una pieza del material bajo estudio al ambiente agresivo, por un periodo de tiempo específico. Como resultado del ataque corrosivo, el cupón pierde una fracción del material metálico mediante</p> <p>El resultado de la prueba se puede expresar en términos de masa pérdida por unidad de área expuesta y por unidad de tiempo o bien, utilizando la densidad del metal, en unidades de longitud de ataque por unidad de tiempo.</p>
TÉCNICAS DE MONITOREO	APLICACIÓN	CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN	DESVENTAJAS
<p><b>Cupones Gravimétricos</b></p> <p><b>O Gravimetría tradicional</b></p>	<p>La técnica es aplicable a todos los ambientes (gases, líquidos y flujos con partículas sólidas)</p>	<p>la velocidad de corrosión promedio, empleando la siguiente ecuación: operación en la línea y tomar las medidas correctivas..</p> $V_c = \frac{(K * W)}{(A * T * D)}$ <p>Donde: }K: constante de corrosión (3.45 x 10<sup>6</sup>).</p> <p>T: tiempo de exposición en horas</p> <p>W: perdida de peso en gramos</p> <p>D: densidad del metal en g/cm<sup>3</sup></p> <p>A: área superficial de la probeta (cm<sup>2</sup>)</p>	<p>el cálculo de la velocidad de corrosión se hace manualmente y Cada cierto tiempo, los cupones de corrosión y las probetas requieren ser removidos y/o reemplazados.</p> <p>Contaminación del cupón de corrosión en la manipulación de pesado produciendo un error en el cálculo de la tasa de corrosión</p> <p>Riesgo de accidentes en el desmonte y montaje de los cupones del sistema</p>

TÉCNICAS DE MONITOREO	MECANISMO	VENTAJAS	PRINCIPIO DE OPERACIÓN
<b>GRAVIMETRICA INSTRUMENTADA</b>	<p>El método de pérdida de peso relaciona el daño causado por la corrosión con pérdida de peso en los materiales y consisten en exponer piezas pequeñas de metal a ambientes corrosivos, para determinar la pérdida de peso del material después de la pruebas (NACE, 1984).</p> <p>Los cupones son piezas simples de metal elaborados a partir del material del sistema que va a ser evaluado, y que presenta por tanto las mismas características de corrosividad.</p>	<p>Pueden ser alimentadas con corriente continua o corriente alterna</p> <p>Pueden proveer una útil correlación cuando se utiliza con otras técnicas como las mediciones ER y LPR</p> <p>La Compensación de temperatura es relativamente fácil</p> <p>Es una técnica de monitoreo automática donde los el monitoreo de la corrosión de puede realizar por el operario sin desmonte del sistema o en línea.</p> <p>Es una técnica fácil y económica con respecto a las demás técnicas automáticas.</p> <p>Puede ser utilizada para medir la corrosión utilizando cupones gravimétricos o biocupones</p> <p>Es aplicable a ambientes líquidos gases .</p>	<p>La tensión o compresión a la que el peso somete a la celda de carga hace variar la longitud del hilo metálico y modifica por lo tanto su resistencia eléctrica”. Esta variación de resistencia se refleja a la salida de la celda de carga como una señal analógica de voltaje generalmente expresada en el orden de los milivoltios.</p> <p>La velocidad de la corrosión se obtiene de la relación voltaje de salida Vs peso del cupón de corrosión</p>
<b>TÉCNICAS DE MONITOREO</b>	<b>APLICACIÓN</b>	<b>CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>GRAVIMETRICA INSTRUMENTADA</b>	<p>La técnica es aplicable a todos los ambientes (gases, líquidos y flujos con partículas <b>sólidas</b>)</p>	<p>El calculo de la rata de corrosión de realiza de acuerdo a la siguiente fórmula:</p> <p>Señal Máx. = Sensitivi x Volt Excita La señal de salida de la celda de carga para cualquier carga está dada por la siguiente ecuación:</p> $Señal(v) = Sensiti * voltaj\ exita * \frac{Carg\ a[g]}{Cap\ celda[Kg]}$	<p>La desventaja de la técnica es que, si la tasa de corrosión varia durante el periodo de exposición, es decir, si se incrementa o disminuye por alguna causa, dicho evento pico no sería evidenciado en el cupón, sin poderse determinar su duración y magnitud.</p>

## CONCLUSIONES

Para llevar a cabo este procedimiento de instalación del sistema de medición de la corrosión se debe tener instalado sobre el gasoducto el correspondiente Access pitting (incluyendo la válvula de paso bridada).

La primera etapa de acondicionamiento del sensor de peso es una fuente regulada de voltaje en serie para conseguir que la tensión continua de alimentación de la celda de carga sea lo más constante posible.

Se diseñó un sensor con un puente de wheasthone con dos galgas, que consigue duplicar la sensibilidad del puente. Esto permite que para una misma deformación, se tenga una mayor señal de salida, para una tensión de alimentación dada.

Para la monitorear la corrosion por el metodo gravimetrico o de perdida de peso se debe obtener una relacionentre el peso en Kg y la señal de salida de la celda de carga en mV, teniendo en cuenta que la salida del sensor es lineal,

El presente trabajo recopila las diferentes tecnicas de monitoreo de la Corrosion en el que se puede hacer un comparativo de las tecnica,el tipo de probetas y los medios en que pueden ser utilizados. El cual nos permite hacer una buena selección de esta aplicación en la industria.

La tabla comparativa muestra que la tecnica de monitoreo de la corrosion de gravimetria instrumentada es aplicable a todos los ambientes (gases, líquidos y flujos con partículas sólidas), también se tiene una medición de la corrosión de manera más exacta ya que se los cupones gravimétricos utilizados son del mismo

material de la tubería en evaluación; además esta técnica tiene la opción de utilizarse para monitoreo de la corrosión por biocupones.

En la técnica de gravimetría instrumentada es posible tener el histórico y datos en tiempo y tener una medida de la velocidad de corrosión real, el cual permite conocer el comportamiento del fenómeno de la corrosión y tomar las medidas correctivas correspondientes.

## RECOMENDACIONES

La implementación de la presente propuesta se deben realizar en estudios futuros para verificar y validar el funcionamiento y desempeño del sensor de peso además de realizar los ajustes de configuración y adecuación del sistema de monitoreo para su puesta a punto.

Los cupones Gravimétricos pueden exponer un área de  $13.2 \text{ cm}^2$  por cada cara, es decir  $26.4 \text{ cm}^2$  por cupón y es posible montar 2 cupones gravimétricos simultáneamente que equivale a un área expuesta total de  $52.8 \text{ cm}^2$ .

La ejecución del presente proyecto será una excelente oportunidad para incorporar nuevas alternativas de monitoreo de la corrosión este se desarrollara por parte de los autores como un aporte tecnológico, brindando una herramienta de monitoreo y control del fenómeno de corrosión que afecta de sobremanera la industria del transporte de hidrocarburos.

Para combatir este fenómeno que afecta la industria del transporte de hidrocarburos.

El dispositivo propuesto se diseñara a futuro para ser utilizado con diferentes fluidos entre ellos gasolina, crudo, nafta y otros derivados del petróleo y se adaptara para diferentes diámetros de tubería

## BIBLIOGRAFÍA

[1] PÉREZ ANGULO Julio Cesar y VILLAMIZAR MONTERO Christian Armando. Diseño de un plan de monitoreo de corrosión en una troncal de inyección de agua campo la cira-Ecopetrol. Bucaramanga 1995. Trabajo de grado (ingeniería química). Universidad industrial de Santander. Facultad de fisicoquímica.

[2] PEÑALOZA BUENO John Iván. Modelo para predecir la velocidad de corrosión generada por CO<sub>2</sub> bajo condiciones de flujo. Bucaramanga 2002. Trabajo de grado (Ingeniería de petróleos). Universidad industrial de Santander. Facultad de fisicoquímica.

[3] FERNÁNDEZ VALDIVIESO Jorge Alberto y VARGAS BARRERA Arnulfo. Evaluación de incrustaciones en línea de producción de los campos morichal, la gloria norte y la gloria de la empresa Perenco Colombia LTD. Bucaramanga 2001. Trabajo de grado (Ingeniería de petróleos). Universidad industrial de Santander. Facultad de fisicoquímica.

[4] PARRA SALDARRIAGA Ramón Alberto. Estudio a los procesos de monitoreo y control de corrosión en las plantas de Ecopetrol gerencia llanos. Bucaramanga 1999. Trabajo de grado (Ingeniería química). Universidad industrial de Santander. Facultad de fisicoquímica.

[5] TECNOLOGIA TOTAL. Estrategia de control de corrosión interior en plantas de crudo y gas [[pdf](http://www.tecnologiatotal.net/Corrosion_Interior.pdf)]. [Citado 09 junio 2011]

[6] ASTM G4-84, "Standard Method for Conducting Corrosion Coupon Tests in Plant Equipment", Annual Book of ASTM Standards. Vol. 3.02, ASTM,

Philadelphia, PA., 1993. Tecnológica de Colombia. Capítulos 1, 2, 4.

[7] GARCÍA, M. y ARCHILA, E. Evaluación de la corrosión del acero *AISI-SAE 1020* por medio de técnicas electroquímicas en los sistemas hidrodinámicos: salmuera- $\text{CO}_2\text{-N}_2$  y salmuera- $\text{H}_2\text{S-N}_2$ . Trabajo de grado de Ingeniería

[8] National Association of Catering Executives. Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations. 2005. NACE Standard RP 0775.

[9]. MALDONADO, M. Optimización del Proyecto de Inyección de Agua del Campo Sacha. Guayaquil, ESPOL, 1996.

[10]. PRADA, Juan c., Instalación, mantenimiento y verificación de puntos del sistema integrado de monitoreo de corrosión (icms3) en las plantas u-2000, u-250 y u-150 del complejo petrolero de Barrancabermeja. Universidad industrial de Santander. Facultad de fisicoquímica. Bucaramanga 1999. (Trabajo de grado).

[11] BUENO, Juan C. y GARCIA, Yady. Diseño de un sistema de monitoreo y análisis de corrosión del sistema de inyección e incrustaciones en pozos productores del campo Tibú. Bucaramanga Trabajo de grado Universidad industrial de Santander. Facultad de fisicoquímica. UIS, 2011. (Tesis de grado)

[12] ASTM G4-84, "Standard Method for Conducting Corrosion Coupon Tests In Plant Equipment", Annual Book of ASTM Standards. Vol. 3.02, ASTM, Philadelphia. 1993.

[13] BALETA, F. Y ARRIETA, W. Desarrollo de una metodología para la evaluación directa de la corrosión exterior para ser usada como alternativa para determinar la integridad de tuberías usadas en el transporte de hidrocarburos.

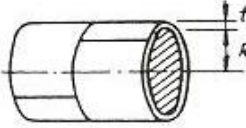
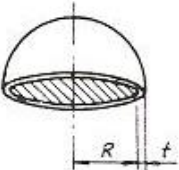
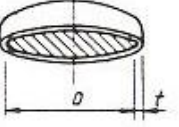
Bucaramanga Trabajo de grado Universidad industrial de Santander. Facultad de fisicoquímica.UIS, 2007. (Tesis de grado)

## REFERENCIAS

- NACE RP0175: Control of Internal Corrosion in Steel pipelines and Piping System. Houston 2003.
- ASTM G1 : Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion test Specimens 2003.
- ASTM G4: Method for Conducting Corrosion Coupons test in Plant Equipment. 2008.
- VIT-GTL-E-IMC-LT02: Monitoreo corrosión interior de líneas de transporte de hidrocarburos y productos refinados
- NACE Standard RP 0775 Preparation and installation of corrosion coupons and interpretation of test data in oilfield operations .Houston. Texas 2005.
- NACE RPO192 Monitoring Corrosion in Oil and Gas Production with Iron Counts. Houston 1984.
- PEMEX No. 07.3.13 PEP Requisitos mínimos de seguridad y diseño, construcción, operación, mantenimiento e inspección de tuberías de transporte.1994.

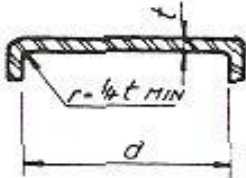
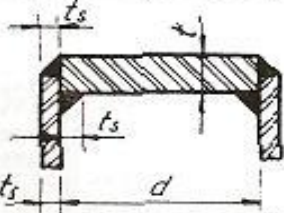
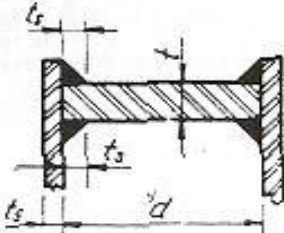
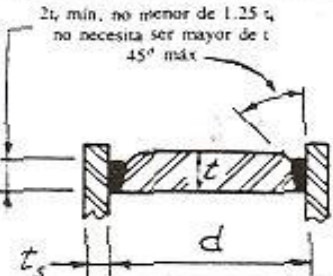
## ANEXOS

### ANEXO A Presión Interna

<h2 style="margin: 0;">PRESION INTERNA</h2> <p style="margin: 0;">FORMULAS EXPRESADAS EN FUNCION DE LAS DIMENSIONES-INTERIORES</p>			
<p>P = Presión de diseño o presión máxima de trabajo permitida, lb/pulg<sup>2</sup>                      S = Valor del esfuerzo del material, lb/pulg<sup>2</sup>, página 159                      E = Eficiencia de la junta, página 142                      R = Radio interior, pulgadas                      D = Diámetro interior, pulgadas                      t = Espesor de pared, pulgadas                      C.A. = Margen por corrosión, pulgadas</p>			
<p>A</p> 	<p style="text-align: center;"><b>CASCO CILINDRICO (COSTURA LONGIT.)<sup>1</sup></b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center; padding: 5px;"><math>t = \frac{PR}{SE - 0.6P}</math></td> <td style="width: 50%; text-align: center; padding: 5px;"><math>P = \frac{SEt}{R + 0.6t}</math></td> </tr> </table> <p>1. Generalmente rige el esfuerzo en la costura longitudinal. Ver página anterior.                      2. Cuando el espesor de pared exceda de la mitad del radio interior o P exceda de 0.385 SE, se aplicarán las fórmulas dadas en el Apéndice del Código, 1-2.</p>	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$
$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$		
<p>B</p> 	<p style="text-align: center;"><b>ESFERA Y CABEZA HEMISFERICO</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center; padding: 5px;"><math>t = \frac{PR}{2SE - 0.2P}</math></td> <td style="width: 50%; text-align: center; padding: 5px;"><math>P = \frac{2SEt}{R + 0.2t}</math></td> </tr> </table> <p>1. Para las cabezas sin brida recta, úsese la eficiencia de la junta de la cabeza al casco si es menor que la eficiencia de las costuras de la cabeza.                      2. Cuando el espesor de pared exceda de 0.356 R, o P exceda de 0.665 SE, se aplicarán las fórmulas dadas en el Apéndice 1-3 de las normas.</p>	$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{R + 0.2t}$
$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{R + 0.2t}$		
<p>C</p> 	<p style="text-align: center;"><b>CABEZA ELIPSOIDAL 2:1</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center; padding: 5px;"><math>t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}</math></td> <td style="width: 50%; text-align: center; padding: 5px;"><math>P = \frac{2SEt}{D + 0.2t}</math></td> </tr> </table> <p>1. Para las cabezas elipsoidales cuya relación del eje mayor al eje menor sea diferente de 2:1, véase el Apéndice 1-4 (c) de las normas.</p>	$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t}$
$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t}$		

## ANEXO B. Presión interna o externa

26

<h1 style="margin: 0;">PRESION INTERNA O EXTERNA</h1> <h2 style="margin: 0;">FORMULAS</h2>	
<p><b>NOTACION</b></p> <p>P = Presión de diseño interna o externa, lb/pulg<sup>2</sup>      E = Eficiencia de la junta</p> <p>d = Diámetro interior del casco, pulgadas</p> <p>S = Valor máximo del esfuerzo permitido del material, lb/pulg<sup>2</sup>, página 159</p> <p>t = Espesor mínimo requerido de la cabeza, excluyendo el margen por corrosión, pulgadas</p> <p>t<sub>h</sub> = Espesor real de la cabeza excluyendo el margen por corrosión, pulgadas</p> <p>t<sub>c</sub> = Espesor mínimo requerido, por presión, del casco sin costura, pulgadas</p> <p>t<sub>r</sub> = Espesor real del casco, excluyendo el margen por corrosión, pulgadas</p>	
<p><b>A</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>CABEZAS CIRCULARES PLANAS</b></p> $t = d \sqrt{0.13 P / SE}$ <p>Esta fórmula se aplicará cuando:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. d no exceda de 24 pulgadas</li> <li>2. t<sub>h</sub>/d no sea menor de 0.05 ni mayor de 0.25</li> <li>3. El espesor de la cabeza, t<sub>h</sub>, no sea menor que el espesor del casco, t<sub>c</sub></li> </ol>
<p><b>B</b></p> 	$t = d \times \sqrt{CP / SE}$ $C = 0.33 \times \frac{t_r}{t_s}$ <p>C MIN. = 0.20</p> <p>Si para calcular t se usa un valor de t<sub>r</sub>/t<sub>s</sub> menor de 1, el espesor del casco, t<sub>c</sub>, debe mantenerse por una distancia hacia adentro desde la cara interior de la cabecera igual a por lo menos <math>2 \sqrt{dt}</math>.</p>
<p><b>C</b></p> 	
<p><b>D</b></p> 	
<p><small>Las cabezas no circulares, las planas amperadas, tapas y las bridas ciegas están comprendidas en las normas, UG-34; otros tipos de elementos de cierre en la norma, UG-35</small></p>	

## ANEXO C. Norma ASTM. D-2688.

### Domesiones del cupón

ASTM D 2688

has a flash point of 71°F, which contains ketones of rosin, surface active agents, alcohols and less than 10 % by volume of pigments for hydrochloric acid.

21.5 *Corrosion Inhibitor*, a nonflammable liquid containing heterocyclic nitrogen bases (usually in the form of salts), surface active agents, and synergists, for sulfuric acid.

21.6 *Hydrochloric Acid (sp gr 1.19)*—Concentrated hydrochloric acid (HCl).

21.7 *Hydrochloric Acid (1+4)*—Mix 1 volume of concentrated HCl (sp gr 1.19) with 4 volumes of water.

21.8 *Hydrochloric Acid (1+1.8, Inhibited)*—Mix 357 mL of concentrated HCl (sp gr 1.19) with 5.0 g of inhibitor (see 21.4). Then dilute to 1 L with water.

21.9 *Isopropyl Alcohol*.

21.10 *Methyl Orange Indicator Solution (0.5 %)*—Dissolve 0.05 g of methyl orange in water and dilute to 100 mL with water.

21.11 *Nitric Acid (sp gr 1.42)*—Concentrated nitric acid (HNO<sub>3</sub>).

21.12 *Nitric Acid-Dichromate Solution*—Mix 24 mL of HNO<sub>3</sub> (sp gr 1.42) with twice the volume of water. Add 22.75 g of sodium dichromate (Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>·H<sub>2</sub>O) and dissolve. Dilute the resulting solution to 1 L.

21.13 *Phosphoric Acid (85 %)*—Concentrated phosphoric acid (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>).

21.14 *Sodium Dichromate (Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>·2H<sub>2</sub>O) crystals*.

21.15 *Sulfuric Acid (sp gr 1.84)*—Concentrated sulfuric acid (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

21.16 *Sulfuric Acid (1+34, Inhibited)*—Slowly add 29 mL of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (sp gr 1.84) to approximately 500 mL of water. Add and dissolve 0.5 g of inhibitor (see 21.5). Dilute the resulting solution to 1 L with water.

21.17 *Trichloroethylene*.

21.18 *Tripol*—Finely granulated, porous, of siliceous rock; amorphous silica (SiO<sub>2</sub>), soft, porous, and free of sharp edges.

21.19 *Trisodium Phosphate (Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>·12H<sub>2</sub>O)*, also available as Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>·3H<sub>2</sub>O. Either grade is satisfactory.

21.20 *Vapor Phase Inhibitor Paper*.<sup>14</sup>

#### 22. Coupon Preparation

22.1 In this procedure, coupons are to be made principally from sheet metal; however, in a few cases, it is permissible to use cast bronze, if

may be necessary to prepare coupons from castings.

22.2 Use a coupon size of 13 by 102 by 3 mm (0.5 by 4.0 by 0.032 in.) for all sheet metal and a 13 by 102 by 3 mm (0.5 by 4.0 by 0.032 in.) for cast metals. Other sizes are suitable, providing the total area is about 258 mm<sup>2</sup> (in.<sup>2</sup>), the principal requirement being to keep the flat surface area large compared to the end area.

22.3 *Sheet Metal Coupon Preparation*—Obtain sheet metal of the type desired except stainless steel; use cold-rolled steel free of spots for ferrous metal. Obtain stainless steel with a No. 4 finish.<sup>15</sup>

22.3.1 Shear 20-gage sheet metal material to the dimensions of 13 by 102 mm (0.5 by 4.0 in.).

22.3.2 Drill or punch a 7-mm (7/8-in.) hole with its center about 8 mm (5/8 in.) from end of the coupon.

22.3.3 Deburr all sharp edges on the coupon specimen using a file or emery belt, and deburr the hole with an oversize drill.

22.3.4 Stamp identifying numbers or letters on the small coupon area between the edge of the mounting hole.

22.4 *Cast Metal Coupon Preparation*—Obtain rough castings of the desired metal, measuring about 19 by 114 by 6 mm (3/4 by 4 1/2 by 1/4 in.) from a commercial foundry or elsewhere.

22.4.1 Surface grind to the dimensions of 13 by 102 by 3 mm (0.5 by 4.0 by 0.125 in.) and surface roughness of about 124 μm.

22.4.2 Drill a 7-mm (7/8-in.) hole with center about 8 mm (5/8 in.) from one end of coupon.

22.4.3 Deburr all sharp edges on the coupon specimen using a file or emery belt, and deburr the hole with an oversize drill.

22.4.4 Stamp identifying numbers or letters on the small coupon area between the edge of the mounting hole.

22.5 *Cleaning Ferrous Metal Coupons*—To remove oil by immersion in benzene. Dry, immerse in a solution containing HCl (1+4) for 30 min at room temperature.

22.5.1 Remove acid from the coupon by three rapid successive rinses in separate 500 mL

<sup>14</sup> Inhibitor paper manufactured by Orchard, 1101 1915 Union Boulevard, St. Louis, Mo., under U.S. Pat. 2,515,151 has been satisfactory for this purpose.

<sup>15</sup> Metals Handbook, American Society of Metals, 1961, p. 477.

# ANEXO D. Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials



Designation: E 10 – 01

American Association State Highway  
and Transportation Officials Standard  
AASHTO No.: T70-86  
An American National Standard

## Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation E 10; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

### 1. Scope

1.1 This test method (Test Method A) covers the determination of the Brinell hardness of metallic materials, including methods for the verification of Brinell hardness testing machines (Test Method B) and the calibration of standardized hardness test blocks (Test Method C).

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

Note 1—In common terminology, the equivalent force in kgf is substituted for N.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines<sup>2</sup>
- E 29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications<sup>3</sup>
- E 74 Practice of Calibration of Force-Measuring Instruments for Verifying the Force Indication of Testing Machines<sup>2</sup>
- E 140 Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Rockwell Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness<sup>2</sup>

### 3. Terminology

#### 3.1 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.1.1 *Brinell hardness number*—a number, which is proportional to the quotient obtained by dividing the test force by the curved surface area of the indentation which is assumed to be spherical and of the diameter of the ball.

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and is the direct responsibility of Subcommittee E28.06 on Indentation Hardness Testing.

Current edition approved February 10, 2001. Published April 2001. Originally published as E 10 – 24 T. Last previous edition E 10 – 00a.

<sup>2</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

$$HBW = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{See Table 1}) \quad (1)$$

where:

$D$  = diameter of the ball, mm,

$F$  = test force, N, and

$d$  = mean diameter of the indentation, mm.

The Brinell hardness is denoted by the symbol: HBW.

3.1.1.1 *Discussion*—In former standards, a steel ball was allowed for hardness values below 450. In cases when a steel ball was used, the Brinell hardness was denoted by HB or HBS.

3.1.1.2 *Discussion*—The symbol HBW is preceded by the hardness value. When conditions other than those specified in 11.1.2 are used, the hardness value is supplemented by an index indicating the test conditions in the order:

(1) Diameter of the ball, in mm,

(2) A value representing the test force in kgf (see Table 3), and,

(3) Duration of loading, in s.

*Examples:*

350 HBW 5/750 = Brinell hardness of 350 determined with a ball of 5-mm diameter and with a test force of 7.355 kN (750 kgf) applied for 10 to 15 s.  
600 HBW 1/30/20 = Brinell hardness of 600 determined with a ball of 1-mm diameter and with a test force of 294.2 N (30 kgf) applied for 20 s.

3.1.1.3 *Discussion*—Brinell hardness numbers vary with the test force used; however, test results will generally be in agreement when the ratio of the test force to the square of the ball diameter is held constant (see Table 3).

3.1.1.4 *Discussion*—Table 2 lists the Brinell hardness numbers corresponding to various diameters of indentations for 29.4 kN (3000 kgf), 14.7 kN (1500 kgf), and 4.90 kN (500 kgf) test forces making it unnecessary to calculate for each test the value of the Brinell hardness number by the above equation in Table 1 when these forces are used with a 10-mm diameter ball.

3.1.2 *Brinell hardness test*—an indenter (tungsten carbide ball with diameter  $D$ ) is forced into the surface of a test piece and the diameter of the indentation  $d$  left in the surface after removal of the test force,  $F$ , is measured. (see Table 1 and Figs. 1 and 2.)

3.1.2.1 *Discussion*—The tungsten carbide ball may be used for materials with a Brinell hardness not exceeding 650.

3.1.3 *calibration*—adjustment of the significant parameters by comparison with values indicated by a reference instrument or by a set of reference standards.

## ANEXO E. Norma API 5L.

separation of at least 6 in. (152 mm) between the skelp end weld and the helical seam weld at the applicable pipe ends. Skelp end welds in finished pipe shall be properly prepared for welding and shall be made by automatic submerged-arc welding, automatic gas metal-arc welding, or a combination of both processes.

### 5.6 TRACEABILITY

#### 5.6.1 PSL 1 Traceability Requirements

The manufacturer shall establish and follow procedures for maintaining heat and/or lot identity until all required heat and/or lot tests are performed and conformance with specification requirements is shown.

#### 5.6.2 PSL 2 Traceability Requirements

The manufacturer shall comply with SR 15.2.

## 6 Material Requirements

### 6.1 CHEMICAL PROPERTIES

#### 6.1.1 Chemical Composition

The composition of steel used for the manufacture of pipe furnished to this specification shall conform to the chemical requirements given in Table 2A (for PSL 1) or Table 2B (for PSL 2). The composition of intermediate grades (higher than X42) shall conform to the chemical requirements of the next higher standard grade. For Grades X42 and higher, by agreement between the purchaser and the manufacturer, elements other than those listed in Tables 2A and 2B (which include columbium [niobium], vanadium, and titanium via the notes to the tables) may be used; however, care should be exercised in determining the alloying content for any given size and wall thickness of pipe, because the addition of such otherwise desirable elements may affect the weldability of the pipe.

#### 6.1.2 Elements Analyzed

As a minimum, each required analysis shall include the following elements:

- Carbon, manganese, phosphorus, sulfur, chromium, columbium [niobium], copper, molybdenum, nickel, silicon, titanium, and vanadium.
- Boron. (But if the heat analysis indicates a boron content less than 0.001%, then no boron determination is required for the product analysis.)
- Any other alloying element added during steelmaking for a purpose other than deoxidation.

#### 6.1.3 Carbon Equivalent (PSL 2 only)

##### 6.1.3.1 Calculation of Carbon Equivalent

For PSL 2 pipe, carbon equivalent ( $CE$ ) calculations shall be based on the product analyses and shall be calculated as follows. All carbon equivalent results shall be reported:

- When the carbon content is less than or equal to 0.12%, the carbon equivalent shall be calculated using the following formula for  $CE(Pcm)$  [see Note 1]:

$$CE(Pcm) = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

If the heat analysis indicates a boron content less than 0.001%, then the product analysis need not include boron, and the boron content can be considered as zero for the  $CE(Pcm)$  calculation.

- When the carbon content is greater than 0.12%, the carbon equivalent shall be calculated using the following formula for  $CE(IIW)$  [see Note 2]:

$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$$

##### 6.1.3.2 Maximum Carbon Equivalent

The carbon equivalent shall not exceed the following:

- For Grade X80 pipe, for all grades of seamless pipe having a specified wall thickness greater than 0.800 in. (20.3 mm), and for pipe designated by the purchaser as high carbon equivalent pipe, the value agreed upon between the purchaser and the manufacturer.
- For pipe not covered in Item a above, a  $CE(Pcm)$  of 0.25% or a  $CE(IIW)$  of 0.43%, whichever is applicable.

Note 1: The  $CE(Pcm)$  formula for low carbon steel is commonly called the Ito-Bessyo formula.  $CE(Pcm)$  is in fact the chemical portion of the full formula. Reference: Y. Ito & K. Bessyo, "Weldability Formula of High Strength Steels Related to Heat Affected Zone Cracking," *Journal of Japanese Welding Society*, 1968, 37, (9), 938.

Note 2: The  $CE(IIW)$  formula is commonly called the  $IIW$  [International Institute of Welding] formula. Reference: Technical Report, 1967,  $IIW$  doc. IX-535-67.

### 6.2 MECHANICAL PROPERTIES

#### 6.2.1 Tensile Properties

PSL 1 Grades A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, and X70 shall conform to the tensile requirements specified in Table 3A.

PSL 2 Grades B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, and X80 shall conform to the tensile requirements specified in Table 3B.

## ANEXO F. Norma NACE.RPo 775-2005

RP0775-2005

2.3.4 Immerse steel coupons in 15% inhibited hydrochloric acid to remove mineral scale and corrosion products. Ultrasonic agitation may be used to accelerate the cleaning process. Numerous commercial inhibitors are available to protect the steel during acid cleaning. The following inhibitor solution has been successful: A stock solution is made of 37.5% HCl to which 10 g/L of 1,3-di-n-butyl-2 thiourea (DBT) has been added.<sup>3</sup> Immediately prior to use, the stock solution is diluted by slowly adding a measured volume of stock solution to an equal volume of distilled water with stirring. Additional information on cleaning metals other than steel should be consulted.<sup>4,5,6,7</sup>

2.3.4.1 Coupons that are not coated with hard scale or tightly adhering corrosion products may be cleaned by blasting with glass beads. Mass loss during blast cleaning should be determined by cleaning unexposed coupons in accordance with Paragraph 2.3.7.

2.3.5 After cleaning, immerse the coupon in a saturated solution of sodium bicarbonate for one minute to neutralize the acid. Rinse with distilled water to remove the neutralizer.

2.3.6 Rinse the coupon immediately in isopropyl alcohol or acetone and dry in a stream of dry air. Air lines should be equipped with traps and filters to remove all oil and water. Coupons with tenacious films should be scrubbed with a household cleanser and 000 steel wool prior to drying with alcohol or acetone. Visually examine the coupon and record observations.

2.3.7 Subject a preweighed blank that was not exposed to the corrodent to the cleaning process to ensure that mass loss from cleaning is not significant.

2.4 Calculation of the Average Corrosion Rate (CR). The following procedures should be used to calculate the average corrosion rate.

2.4.1 Determine the mass loss of the corrosion coupon and divide the mass loss by the product of the metal density (Table 1), the total exposed surface area, and the exposure time to obtain the average rate of corrosion. The following equations may be used to determine the average corrosion rate depending on the units desired.<sup>8</sup>

2.4.1.1 A calculation of average corrosion rate, expressed as a uniform rate of thickness loss per

unit time in millimeters per year or millimeters per annum (mm/y or mm/a), is shown in Equation (1):

$$CR = \frac{W \times 365 \times 1,000}{ATD} = \frac{3.65 \times 10^5 \times W}{ATD} \quad (1)$$

Where:

CR = average corrosion rate, millimeters per year (mm/y or mm/a)  
 W = mass loss, grams (g)  
 A = initial exposed surface area of coupon, square millimeters (mm<sup>2</sup>)  
 T = exposure time, days (d)  
 D = density of coupon metal, grams per cubic centimeter (g/cm<sup>3</sup>)

2.4.1.2 A calculation of average corrosion rate, expressed as uniform rate of thickness loss per unit time in mils per year (mpy), is shown in Equation (2):

$$CR = \frac{W \times 365 \times 1,000}{ATD \times (2.54)^3} = \frac{2.227 \times 10^4 \times W}{ATD} \quad (2)$$

Where:

CR = average corrosion rate, mils per year (mpy)  
 W = mass loss, grams (g)  
 A = initial exposed surface area of coupon, square inches (in.<sup>2</sup>)  
 T = exposure time, days (d)  
 D = density of coupon metal, grams per cubic centimeter (g/cm<sup>3</sup>)

2.4.1.3 A calculation of the average corrosion rate, expressed as a uniform rate of mass loss per unit area per unit time in grams per square meter per day (g/m<sup>2</sup>/d), is shown in Equation (3):

$$CR = \frac{W}{A \times T} \quad (3)$$

Where:

CR = average corrosion rate, grams per square meter per day (g/m<sup>2</sup>/d)  
 W = mass loss, grams (g)  
 A = initial exposed area of coupon, square meters (m<sup>2</sup>)  
 T = exposure time, days (d)

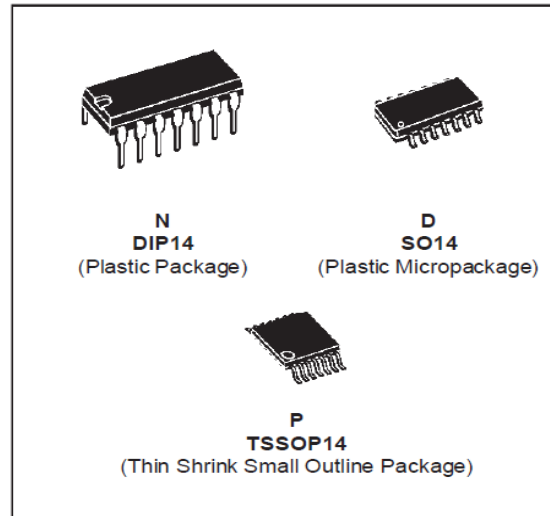
## ANEXO G. Low Power Quad Operational Amplifier



**LM290**

### LOW POWER QUAD OPERATIONAL AMPLIFIER

- WIDE GAIN BANDWIDTH : 1.3MHz
- INPUT COMMON-MODE VOLTAGE RANGE INCLUDES GROUND
- LARGE VOLTAGE GAIN : 100dB
- VERY LOW SUPPLY CURRENT/AMPLI : 375µA
- LOW INPUT BIAS CURRENT : 20nA
- LOW INPUT OFFSET CURRENT : 2nA
- WIDE POWER SUPPLY RANGE :  
SINGLE SUPPLY : +3V TO +30V  
DUAL SUPPLIES : ±1.5V TO ±15V



#### DESCRIPTION

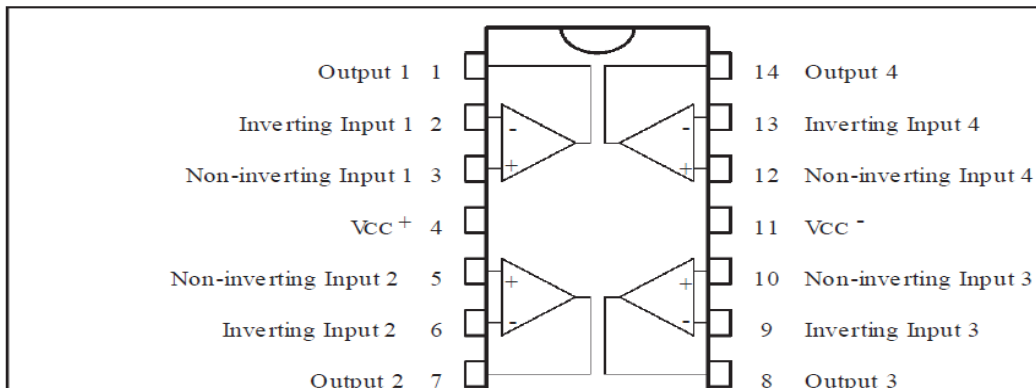
This circuit consists of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically for automotive and industrial control systems. It operates from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

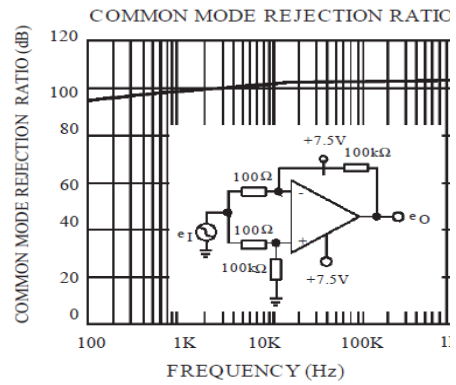
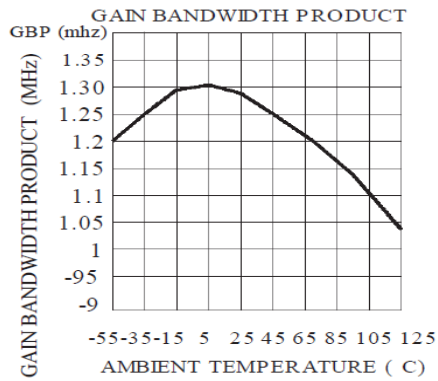
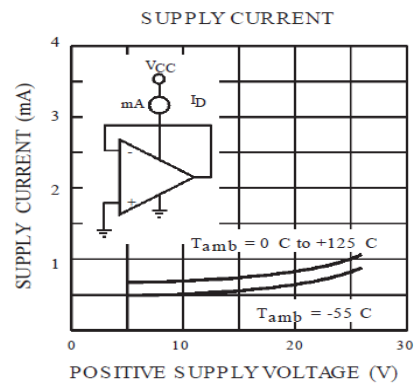
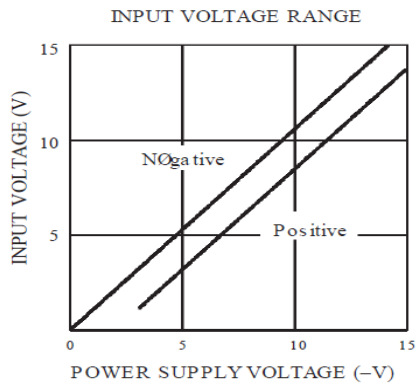
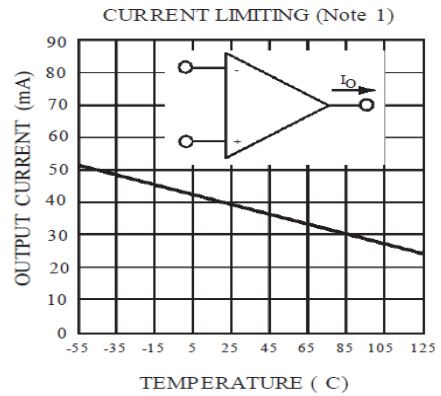
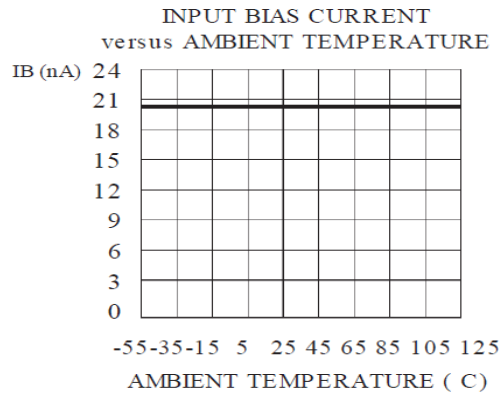
#### ORDER CODES

Part Number	Temperature Range	Package		
		N	D	P
LM2902	-40°C, +125°C	•	•	•

**Example :** LM2902D

#### PIN CONNECTIONS (top view)





## ANEXO H

### Norma ASTM G1.

El siguiente anexo muestra la fórmula de velocidad de corrosión y las constantes que la conforman obtenidas de la norma ASTM G1.

#### Assessment of Corrosion Damage

The initial total surface area of the specimen (making corrections for the areas associated with mounting holes) and the mass lost during the test are determined. The average corrosion rate may then be obtained as follows:

$$\text{Corrosion Rate} = (K \times W)/(A \times T \times D)$$

where:

$K$  = a constant (see 8.1.2),

$T$  = time of exposure in hours,

$A$  = area in  $\text{cm}^2$ ,

$W$  = mass loss in grams, and

$D$  = density in  $\text{g/cm}^3$  (see Appendix X1).

8.1.2 Many different units are used to express corrosion rates. Using the units in 7.1 for  $T$ ,  $A$ ,  $W$ , and  $D$ , the corrosion rate can be calculated in a variety of units with the following appropriate value of  $K$ :

Corrosion Rate Units Desired	Constant ( $K$ ) in Corrosion Rate Equation
mils per year (mpy)	$3.45 \times 10^6$
inches per year (ipy)	$3.45 \times 10^3$
inches per month (ipm)	$2.87 \times 10^2$
millimeters per year (mm/y)	$8.76 \times 10^4$
micrometers per year ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$8.76 \times 10^7$
picometers per second (pm/s)	$2.78 \times 10^6$
grams per square meter per hour ( $\text{g}/\text{m}^2\text{-h}$ )	$1.00 \times 10^4 \times D$
milligrams per square decimeter per day (mdd)	$2.40 \times 10^6 \times D$
micrograms per square meter per second ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{-s}$ )	$2.78 \times 10^6 \times D$

## ANEXO G.

### circuito electronico completo del sensor de peso

