

DEFINICIÓN DEL ESQUEMA CONCEPTUAL PARA DISEÑO DE PROTOTIPO  
DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA EN VARILLA CONTINUA DE BOMBEO  
MECÁNICO DE POZOS

MARIA LUCIA SALAS CABEZAS

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN - COLOMBIA

2015

DEFINICIÓN DEL ESQUEMA CONCEPTUAL PARA DISEÑO DE PROTOTIPO  
DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA EN VARILLA CONTINUA DE BOMBEO  
MECÁNICO DE POZOS

MARIA LUCIA SALAS CABEZAS

TRABAJO DE GRADO MAESTRÍA EN INGENIERÍA

ASESOR

PHD. LUIS ALBERTO MORA GUTIÉRREZ

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN - COLOMBIA

2015

## CONTENIDO

CONTENIDO.....	3
ILUSTRACIONES.....	5
<b>0 PRÓLOGO.....</b>	<b>6</b>
<b>0.1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
<b>0.2 ANTECEDENTES.....</b>	<b>7</b>
<b>0.3 Justificación.....</b>	<b>8</b>
<b>0.4 OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>9</b>
<b>0.5 OBEJTIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>9</b>
0.5.1 Uno - Sistema de bombeo mecánico.....	9
0.5.2 Dos - Análisis de Fallas para Varillas Continuas.....	9
0.5.1 Tres - Aplicación de Ensayos.....	9
0.5.2 Cuatro - Definición de Variables Críticas.....	10
0.5.3 Cinco - Diseño Funcional.....	10
0.5.1 Seis - Conclusiones.....	10
<b>1 SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 OBJETIVO 1.....</b>	<b>11</b>
<b>Describir las características generales y operativas de la varilla continua para bombeo mecánico de pozos.....</b>	<b>11</b>
<b>1.2 INTRODUCCIÓN DE CAPITULO 1.....</b>	<b>11</b>
<b>1.3 DESARROLLO DE CAPITULO 1.....</b>	<b>11</b>
1.3.1 Bombeo Mecánico.....	11
1.3.1 Ventajas del Bombeo Mecánico.....	13
1.3.2 Desventajas del Bombeo Mecánico.....	14
1.3.3 Unidad de Bombeo.....	14
1.3.4 Sarta de Varillas.....	15
1.3.5 Tipos de Varillas.....	17
1.3.6 Mecanismo de Extracción.....	18
<b>1.4 CONCLUSIONES OBJETIVO 1.....</b>	<b>19</b>
<b>La sección detalla y desarrolla a cabalidad, todas las partes relevantes de la varilla continua para bombeo mecánico de pozos, mediante su descripción detallada, figuras y componentes necesarios y relevantes de la misma, con el fin de determinar los fundamentos de los tratamientos temáticos que siguen a continuación.....</b>	<b>19</b>
<b>2 ANÁLISIS DE FALLAS PARA VARILLAS CONTINUAS.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 OBJETIVO.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 INTRODUCCIÓN DE CAPÍTULO 2.....</b>	<b>20</b>
2.2.1 Falla.....	20
2.2.2 Mecanismo de Falla.....	21
2.2.3 Modo de Falla.....	21
2.2.4 Análisis de Falla como estrategia en la gestión del Mantenimiento.....	21
2.2.5 Fallas en Varillas de Bombeo Mecánico de Pozos.....	23
2.2.6 Tipos de Fallas Identificadas.....	23
2.2.6.1 Fallas de tipo Mecánico.....	23
2.2.6.2 Fallas de tipo Químico.....	26
2.2.6.3 Concentradores de Esfuerzo.....	27
<b>1.5 CONCLUSIONES DE OBJETIVO 2.....</b>	<b>27</b>

<b>3</b>	<b><i>APLICACIÓN DE ENSAYOS</i></b> .....	<b>29</b>
3.1	OBJETIVO 3 .....	29
3.2	INTRODUCCIÓN DE CAPÍTULO 3 .....	29
3.3	DESARROLLO DE CAPÍTULO 3 .....	29
3.4	INSPECCIÓN VISUAL MICRO-MACRO.....	30
3.5	ENSAYO DE MICRO Y MACRO DUREZA .....	30
3.6	Análisis de Composición química .....	30
3.7	ANÁLISIS METALOGRÁFICO .....	31
3.8	ENSAYO DE TENSIÓN .....	31
3.9	Ensayo Charpy .....	31
3.10	FRACTOGRAFÍA .....	31
3.11	MICROSCOPIA ÓPTICA.....	32
3.12	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO .....	32
3.13	MICROSCOPIA COFOCAL CON RECONSTRUCCIÓN 3D .....	32
3.14	RESULTADOS.....	33
•	Inspección Visual .....	33
<b>4</b>	<b><i>DEFINICIÓN DE VARIABLES CRITICAS</i></b> .....	<b>44</b>
4.1	OBJETIVO 4 .....	44
4.2	DESARROLLO DE CAPITULO 4 .....	44
4.3	CONCLUSIONES DE CAPITULO 4 .....	47
<b>5</b>	<b><i>DISEÑO FUNCIONAL</i></b> .....	<b>48</b>
5.1	OBJETIVO 5 .....	48
5.2	INTRODUCCIÓN DE CAPITULO 5 .....	48
5.3	DESARROLLO DE CAPITULO 5 .....	48
5.4	CONCLUSIONES DE CAPITULO .....	49
5.4.1	De las características Físicas .....	49
5.4.2	De la Estructura Funcional .....	50
5.4.2.1	Confiableidad:.....	50
5.4.2.2	Continuidad: .....	50
<b>6</b>	<b><i>CONCLUSIONES</i></b> .....	<b>51</b>
6.1	OBJETIVO 6 .....	51
6.2	CONCLUSIONES GENERALES .....	51
6.2.1	Del Diseño del Dispositivo para Inspección No Destructiva .....	51
	<b><i>BIBLIOGRAFÍA</i></b> .....	<b>52</b>

## ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Caracterización de los Sistemas de Bombeo Mecánico.....	13
Ilustración 2 - Ejemplo varilla continua para bombeo mecánico de pozos .....	16
Ilustración 3 - Tipo de Varilla y Material .....	18
Ilustración 4 - Diámetro de Varilla y Denominación .....	18
Ilustración 5 - Etapas Extracción de Crudo .....	19
Ilustración 6 - Niveles y categorías del mantenimiento bajo enfoque sistémico .....	21
Ilustración 7 - Nivel Estratégico - CMD.....	22
Ilustración 8 - Identificación de Muestras .....	29
Ilustración 9 - Metodología General para Análisis de Causa Raíz aplicada.....	29
Ilustración 10 - Inspección Visual de las Muestras – Identificación de Morfología de Falla ...	33
Ilustración 11 - Condiciones Ensayo de Dureza.....	36
Ilustración 12 - Esquema y Resultados Ensayo de Dureza .....	36
Ilustración 13 - Análisis Metalográfico .....	37
Ilustración 14 - Condiciones Ensayo de Tensión .....	40
Ilustración 15 - Resultados Ensayo de Tensión .....	40
Ilustración 16 - Fractografía .....	41

## 0 PRÓLOGO

### 0.1 INTRODUCCIÓN

La mayoría de los eventos de falla asociados al proceso de levantamiento artificial para extracción de crudo en Colombia y en todos los lugares donde se aplica este tipo de proceso, son atribuidos a discontinuidades en uno de los tres componentes principales del fondo del pozo: Bomba de fondo, varilla de bombeo o sarta de la tubería. Cualquier evento de falla en los componentes antes mencionados, generalmente, se define como evento catastrófico e inevitablemente requiere atención inmediata que minimice los costos asociados al evento.

Es bien sabido que las intervenciones a realizar para inspección o reemplazo de los componentes trae consigo la generación de riesgos para la seguridad de operarios, de comunidades cercanas y del medio ambiente que rodea el lugar de operación.

Se ha identificado que la dificultad en la eliminación de los fallos asociados a este tipo de componentes se encuentra en el desconocimiento de los modos y mecanismos que generan los eventos y por eso, para hablar de prevención o eliminación de fallas es importante en primer lugar determinar los factores que las desencadenan. A partir de esta información, las actividades pueden encaminarse en la mitigación o eliminación de la causa raíz de las fallas que generan paros imprevistos.

El índice de frecuencia de fallas está definido como el número total de fallas de los componentes en un periodo determinado, en este particular caso que ocurrirían en un pozo cada año. Se ha identificado que aquellos pozos, cuyo seguimiento muestra que mantienen una alta frecuencia de eventos de falla, se identifican por quienes los operan como, pozos “problema” y por lo tanto, todas las actividades encaminadas hacia la determinación de soluciones efectivas pueden determinar la continuación de la operación de los mismos. Para el propósito del presente proyecto, el análisis será centrado en las fallas de las varillas de bombeo.

El proyecto considera el análisis de los modos y mecanismos de falla asociados a las varillas para bombeo continuo, elementos que por sus características físicas requieren mayores tiempos de inspección y mayor destreza de los inspectores; es el componente, que del grupo de tres elementos que conforman el sistema, constituyen quizá el más alto factor de riesgo de fallas dado que su inspección total es considerada muy difícil de realizar, por los recursos que se necesitarían.

El proyecto se estructura en cinco capítulos: el primero, trata los conceptos de bombeo mecánico, características y funciones de la varilla continua; el capítulo dos presenta la descripción de los modos y mecanismos de falla asociados a varilla continua para bombeo mecánico, en el cuarto capítulo se proponen

alternativas de mitigación de los modos y mecanismos de falla identificados, entre los cuales se caracteriza un dispositivo que permita la inspección continua de la varilla y reduzca los riesgos para los operarios; las conclusiones generales constituyen el quinto capítulo.

## 0.2 ANTECEDENTES

Para operar, el sistema de bombeo mecánico (*Sucker Rod Pumping*) se requiere el uso de varillas de bombeo que permitan transmitir el movimiento alternativo desde superficie hasta el pistón de la bomba. Durante los procesos de transporte, almacenamiento, manipulación, instalación, operación e inspección, estas varillas están sometidas a mecanismos y agentes que pueden desencadenar eventos de fallas, dado el permanente estado crítico de estos componentes.

El periodo considerado como uno de los más críticos, indudablemente es la operación de las varillas, en donde estos elementos son expuestos a cargas máximas, mínimas e incluso estados intermedios. El estado antes descrito, genera periodos de cargas cíclicas que fatigan el material y lo llevarán al almacenamiento de altos niveles de esfuerzo en su estructura. Si existiese algún tipo de concentrador de esfuerzo superficial, subsuperficial o interno (entallas, puntos de impacto, desgaste químico y/o mecánico), la acumulación de esfuerzo inducirá la modificación de las propiedades mecánicas originales de los elementos: límite de fluencia, resistencia última, porcentaje de elongación, entre otros, y por lo tanto la probabilidad de que se presenten fallas intempestivas es alta.

Es bien sabido que aunque existen métodos teóricos para determinar las cargas a fatiga, estos constituyen únicamente aproximaciones y por lo tanto, para incrementar los factores de trabajo seguro de las varillas, hoy se requiere realizar inspección directa de la varilla e interpretar los resultados a criterio del inspector. Dichas inspecciones se realizan con inspectores en cabeza de pozo, en sitios de almacenamiento de los carretes de varilla, durante algún periodo de su vida útil, lo que conlleva a la asunción de riesgos para la seguridad de los mismos.

En condiciones normales de operación, es decir, calidad de material esperada, buena instalación y ausencia de sobrecarga, sobrevienen las fallas debido a fatiga en las varillas. Las primeras etapas de la falla se asocian a la acumulación de esfuerzos en puntos de susceptibilidad en superficie o bajo esta. En una etapa posterior, la afectación se propaga rápidamente. Una vez la falla avanza hacia el área afectada se expande rápidamente y evoluciona produciendo una la falla.

Aunque el modo normal de falla en las varillas se asocia a la sobrecarga por fatiga, las condiciones externas o internas que desencadenan la concentración de esfuerzos pueden afectar de sobremanera la vida útil de los elementos de interés.

### 0.3 JUSTIFICACIÓN

La industria de hidrocarburos, al igual que cualquier tipo de industria, procura mantener la funcionalidad de los equipos al menor costo, en periodos que representen el cumplimiento de las expectativas esperadas de acuerdo con su diseño.

Para los operadores, este proyecto constituye una herramienta que contribuye a la formulación de planes de acción eficientes y por otra parte, se constituye como punto de partida para el diseño y construcción de herramientas de inspección que permitan obtener datos con menores incertidumbres y que disminuyan los riesgos para operarios y medio ambiente.

Estos tipos de ensayos corresponden a la aplicación de fenómenos físicos: capilaridad, emisión de partículas subatómicas, ondas mecánicas y/o electromagnéticas, absorción, etcétera.

Es bien sabido que las técnicas de inspección basadas en los principios del electromagnetismo son aplicadas para detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales dependiendo de la frecuencia de inspección. Para optimizar las labores de inspección de equipo de subsuelo como tubería de perforación y producción, *Drill pipe y Tubing*, para bombeo mecánico se han aplicado técnicas como inducción de corrientes en el material a través de bobinas o probetas de inspección excitadas con corriente proveniente de una fuente eléctrica. Tecnologías similares han sido aplicadas en varilla para bombeo, pero estas únicamente han sido efectivas en varilla convencional dado el tamaño de las mismas, la restricción para su aplicación en varilla continua se presenta en el alcance de inspección con respecto a la longitud del activo.

Todas las técnicas usadas hoy en día para la inspección de varilla continua que corresponden a las técnicas convencionales de Ensayos No Destructivos, deben realizarse antes o después de las actividades de Pulling (Remoción de equipamiento de fondo de pozo) durante el desarrollo de tareas de mantenimiento. En cualquier instante de la vida útil de las varillas debe realizarse el proceso de "Verificación física" lo que corresponde a la inspección para verificación de dimensiones y estado general; pero para el desarrollo de esta etapa deberán elegirse puntos determinados de aplicación ya que la inspección completa implica prolongados tiempos y una logística de manipuleo de varilla complejo.

Para la inspección de Varilla Convencional y tramos de Varilla continua, hoy se aplican comúnmente las técnicas citadas a continuación:

- Inspección con Partículas Magnéticas: Este ensayo cubre la inspección de superficie y subsuperficie del Drill Pipe, se aplica para detección de fallas

transversales y volumétricas, usando un campo AC Activo. El área efectiva de inspección corresponde a las primeras 36 pulgadas desde el punto de aplicación del campo magnético.

- Inspección con Tintas Penetrantes: Este ensayo cubre la inspección de superficie externa, se aplica para detección de fallas abiertas a la superficie, usando el principio de capilaridad. El área efectiva de inspección corresponde a la zona de preparación superficial y aplicación de la tinta. Aunque existen métodos de aplicación continua de tintas penetrantes, estos generalmente están instalados de manera permanente en un taller de la empresa de inspección. Es una actividad considerada inviable de realización en sitio para el total de la superficie de la varilla continua.
- Inspección por Radiografía industrial: Este ensayo permite identificar discontinuidades lineales y/o volumétricas en las varillas; implica la movilización del equipo de emisión de rayos Gamma/ Rayos X y el área inspeccionada corresponderá dependiendo de la capacidad del equipo; para inspeccionar completamente la varilla se requerirá periodos de tiempo extensos.

#### 0.4 OBJETIVO GENERAL

Diseño funcional de un Prototipo para identificación de discontinuidades geométricas asociadas a modos de falla en Varilla Continua, para Bombeo Mecánico de Pozos petroleros.

#### 0.5 OBEJTIVOS ESPECÍFICOS

##### 0.5.1 Uno - Sistema de bombeo mecánico

Describir las características generales y operativas de la varilla continua para bombeo mecánico de pozos.

##### 0.5.2 Dos - Análisis de Fallas para Varillas Continuas

Caracterizar los modos de falla generales para las varillas continuas para bombeo mecánico de pozos.

##### 0.5.1 Tres - Aplicación de Ensayos

Aplicar un paquete de ensayos destructivos y no destructivos como mecanismo de evidencia para descartar o validar las hipótesis de falla en eventos reales asociados a varilla continua.

#### 0.5.2 Cuatro - Definición de Variables Críticas

Definir las variables que el dispositivo reconozca como críticas para monitorear el estado superficial de la varilla. NIVEL QUE

#### 0.5.3 Cinco - Diseño Funcional

Realizar el diseño funcional de un prototipo de dispositivo para inspección no destructiva para varilla continua.

#### 0.5.1 Seis - Conclusiones

Presentar Principales Conclusiones del proyecto.

# 1 SISTEMA DE BOMBEO MECÁNICO

## 1.1 OBJETIVO 1

Describir las características generales y operativas de la varilla continua para bombeo mecánico de pozos.

## 1.2 INTRODUCCIÓN DE CAPITULO 1

La siguiente sección, proporciona los fundamentos conceptuales sobre Bombeo Mecánico de Pozos, Varilla Continua, Falla, Modos y Mecanismos de falla con miras al cumplimiento del objetivo general del proyecto.

## 1.3 DESARROLLO DE CAPITULO 1

El mantenimiento industrial puede definirse como una ciencia, ya que cumple todos los requisitos, que se define para ello en la RAE@<sup>1</sup>, la cual define, que un conjunto de conocimientos que se obtiene a través de la observación, del estudio, de la experiencia y del razonamiento, debidamente estructurados en forma sistémica y de los cuales se pueden deducir principios, leyes generales, comportamientos y predicciones, etc., permiten constituir una ciencia (RAE@, 2008).

El considerar el mantenimiento como una ciencia permite su tratamiento profundo, serio, coherente y estructurado, de tal forma que todos los conocimientos que se desarrollan sean realizables y útiles a los lectores (Mora L. A., 2009). El servicio de mantenimiento está enmarcado en una empresa en la función de producción la cual logra la más alta productividad mediante el uso eficaz de los factores (Mora A.-G., Mantenimiento Industrial Efectivo, 2012).

El conocimiento de los conceptos necesarios asociados a todos los factores involucrados en un evento de falla, constituye una herramienta básica a la hora de formular acciones encaminadas a la mitigación de la causa raíz de los eventos de fallo.

### 1.3.1 Bombeo Mecánico

Durante las primeras etapas, generalmente los pozos petroleros presentan la

<sup>1</sup> El símbolo @ se utiliza en esta monografía para denotar la bibliografía de Internet y RAE Real Academia Española.

capacidad de fluir hacia el exterior de manera natural, asociado esto, entre otros aspectos, a la condición de presión interna que poseen, que de una u otra forma aseguran que el flujo recorra la vía determinada hacia el exterior, sobreponiendo la suma de las pérdidas parciales a lo largo del recorrido. Una vez la condición antes descrita, termina, y con el propósito de continuar la extracción del recurso, es necesario instalar un sistema de levantamiento artificial.

Existen varios tipos de sistemas de levantamiento artificial, estos deben suministrar la energía necesaria para mover los fluidos desde el pozo hasta superficie. Entre los sistemas de levantamiento se encuentran el bombeo mecánico, que es tal vez, el más común alrededor del mundo; sistema de cavidades progresivas y bombeo electrosumergible. Dado el interés particular del proyecto, se ampliará la información particular acerca de sistema de bombeo mecánico.

En general, los métodos de levantamiento artificial se clasifican de distintas formas, y una de ellas es el particular Bombeo por Sarta de Varillas, estos sistemas usan varillas conectadas a la bomba en fondo de pozo y en el extremo opuesto al mecanismo superficial. Para trabajar, las varillas oscilan o rotan, según el tipo de bomba que sea instalada. Lo más común es que en pozos multifásicos tipo crudo/agua, se instalen bombas de desplazamiento positivo que trabajan con un movimiento vertical alterno.

El sistema de extracción de crudo por bombeo mecánico consiste en instalar una bomba en subsuelo, y proveerle energía a través de una sarta de varillas, esta energía se genera en un motor eléctrico o en procesos de combustión interna, la cual moviliza una unidad de superficie mediante un sistema mecánico de engranajes y correas. La aplicación de este tipo de métodos, depende de las características del pozo objetivo.

El método de levantamiento artificial más común y antiguo del mundo es el bombeo mecánico. Debido a su simplicidad y robustez, puede ser aplicado en casi todos los campos que lo requieran levantamiento y por ello es aplicado en la mayoría de sistemas de levantamiento en el ámbito nacional.

Este equipo permite la entrada de fluido de la formación a la sarta de producción y le proporciona la energía necesaria para levantarlo hasta la superficie. (VILLAMIZAR, 2014).

La bomba de subsuelo debe considerarse como el corazón de una instalación de bombeo, porque sin una bomba que funcione correctamente, se puede obtener muy poca o ninguna producción en pozos con baja presión de fondo. Las bombas de subsuelo utilizadas en el Bombeo Mecánico trabajan sobre el principio del desplazamiento positivo y son del tipo cilindro-pistón.

La unidad de superficie imparte el movimiento ascendente y descendente a la sarta de varillas de succión que mueve el pistón de la bomba, colocada en la sarta de producción, a cierta profundidad del fondo del pozo.

Está compuesto básicamente por las siguientes partes:

- Equipo de Superficie
  - Motor (Eléctrico o a Combustión)
  - Unidad de Bombeo
  - Cabeza de Pozo
- Equipo de Fondo
  - Tubería de Revestimiento (Casing)
  - Tubería de Producción (Tubing)
  - Varillas
  - Bomba (Cilindro, Pistón y Válvulas de Bola)
  - Anclas de Tubería

En el cuadro a continuación se muestran las características más importantes que en los sistemas de Bombeo mecánico:

**Ilustración 1 - Caracterización de los Sistemas de Bombeo Mecánico**

Criterio	Rango Típico	Máximos
Profundidad de Asentamiento	100-8000 ft	12000 ft
Caudal de Producción	5-1500 BFPD	5000 BFPD
Temperatura de operación	38-177°C	288°C
Desviación del pozo	0-20°C	90°C
Manejo de corrosión	De bueno a excelente, con materiales de última tecnología.	
Manejo de Sólidos	De razonable a bueno	
Gravedad API del fluido	>8°API	
Tipo de Motor	Eléctrico o de combustión interna	

### 1.3.1 Ventajas del Bombeo Mecánico

El sistema de bombeo mecánico ofrece, entre otras ventajas:

- Operación sencilla
- Aplicable para campos en donde el crudo ha sido caracterizado como de alta viscosidad y temperatura
- Es un mecanismo aplicable a lo largo de toda la vida productiva de un pozo
- Mantiene su funcionalidad incluso con bajos niveles de presión al ingreso y aun así es posible obtener niveles máximos de producción.
- Su uso es posible con más de una fuente de poder: flujo eléctrico o gas
- Generalmente ofrece mayor eficiencia que los sistemas de levantamiento artificial.
- Los componentes son fácilmente reemplazables
- Por lo general las unidades son reutilizables en otros pozos

### 1.3.2 Desventajas del Bombeo Mecánico

El sistema de bombeo mecánico, a través de la experiencia ha presentado las siguientes desventajas:

- El equipo de superficie es robusto y pesado, para su instalación requiere un espacio amplio.
- No recomendable para instalación en pozos con desviaciones altas
- Posiblemente presentará eventos de bloqueo ante una salida excesiva de gas libre a la entrada de la bomba
- En pozos con altos niveles de arena en producción, no funcionan.
- Su instalación no puede realizarse en áreas urbanas pues esto representa un riesgo para la seguridad de la comunidad cercana.
- No se recomienda su instalación cuando la relación gas/líquido es alta.

### 1.3.3 Unidad de Bombeo

La unidad de bombeo tiene como función la conversión del movimiento rotatorio del motor principal en movimiento oscilatorio, ascendente-descendente de la sarta de varillas, este ciclo se conoce como recorrido.

La unidad de bombeo la componen, la Caja Reductora (*Gear Reducer*) y los Contrapesos (*Counterweight*).

El Instituto Americano del Petróleo (*American Petroleum Institute-API*), ha clasificado las unidades de bombeo mecánico de acuerdo con la forma y geometría estructural, de la siguiente manera:

- Convencional

- Neumático
- Mark II

Así mismo, API, desarrolló la metodología para la identificación de dichas unidades de bombeo. La descripción general de esta metodología se muestra a continuación:

**V - XXX - YYY - ZZZ**

En donde,

V, Representa el tipo de Unidad, así:

- C: Convencional
- A: Balanceada por Aire
- B: Con contrapeso en el Balancín
- M: *Mark II*
- RM: *Reverse Mark*

**XXX**, Representa el máximo torque en la caja reductora en miles pulg-lbs. Se adiciona la letra “D”, si la caja tiene doble reducción.

**YYY**, Representa la carga máxima de diseño estructural en cientos de libras.

**ZZZ**, Representa el máximo recorrido en pulgadas.

[http://es.slideshare.net/gabosocorro/produccion-2-bombeo-mecanico?next\\_slideshow=1](http://es.slideshare.net/gabosocorro/produccion-2-bombeo-mecanico?next_slideshow=1)

#### 1.3.4 Sarta de Varillas

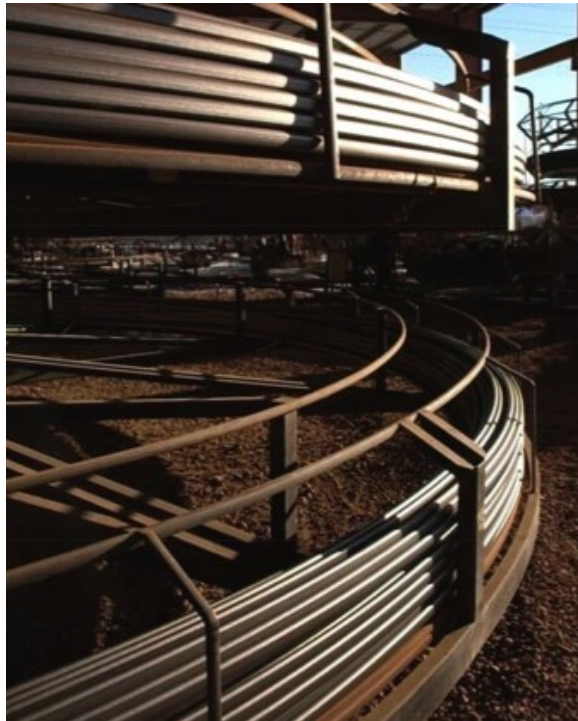
La sarta de varillas constituye la parte fundamental del sistema de bombeo, dado que de su función depende completamente la producción. En palabras simples la función de las varillas es transmitir la energía entre superficie y subsuelo. Como se ha mencionado anteriormente, un evento de falla en la sarta de varillas conlleva a la parada total del proceso de producción. Es por esto que un diseño correcto, materiales de óptima calidad que cumplan con los estándares, instalación adecuada y en sí, el cuidado debido en cada uno de sus procesos, contribuye en gran porcentaje a la garantía de una buena condición de operación y por lo tanto se relaciona directamente con los costos de producción del pozo.

La sarta de varillas de succión corresponde a un sistema vibratorio complejo mediante el cual el equipo en superficie transmite energía o movimiento a la bomba subsuperficial. La selección de la sarta de varillas depende de la profundidad del pozo y las condiciones de operación que este tenga,

generalmente se elige varilla lo más ligera posible pero cuya resistencia se encuentre dentro de los rangos permisibles de acuerdo con el esfuerzo de operación al que estará sometida, esta resistencia estará determinada por las propiedades físicas, químicas y mecánicas del material y de los procesos de conformado que hayan tenido lugar.

La clase de varillas más usadas son las varillas de acero sólido elaboradas bajo estándares del Instituto Americano del Petróleo-API (*American Petroleum Institute*) desde 1926. Las terminaciones de las varillas son forjadas a altas temperaturas y luego tratadas. A continuación se muestran algunos ejemplos de las varillas en mención.

**Ilustración 2 - Ejemplo varilla continua para bombeo mecánico de pozos**



(Weatherford, 2015)

Los materiales de las varillas de acero sólido normalmente tienen un contenido de hierro mayor al 90%. Elementos de aleaciones son usados para incrementar la resistencia, dureza, mejorar los efectos de los tratamientos metalúrgicos y para combatir corrosión. Los aceros usados para la fabricación de varillas se dividen en dos categorías: Aceros de Carbón y Aleaciones. Los primeros contienen solo carbón, manganeso, silicón, fósforo y azufre. Las aleaciones contienen otros elementos adicionales.

Las varillas pueden ser de diferentes clases:

- Clase K, Caracterizadas por su resistencia a la corrosión
- Clase C, diseñada para ser resistente a la corrosión y ser sometida a trabajo pesado.
- Clase D, diseñada para soportar altas cargas en medios ausentes de H<sub>2</sub>S

### 1.3.5 Tipos de Varillas

La clasificación general de las varillas corresponde a dos grupos, Convencionales y No Convencionales

Varillas Convencionales: han sido diseñadas de acuerdo con las especificaciones de la norma API SPEC 11B8. La composición de estas varillas de acero corresponden con las recomendaciones de la AISI (American Iron and Steel Institute), y deben por otra parte, ha sido definido que serán tratadas térmicamente de acuerdo con los requerimientos de propiedades mecánicas de API (American Petroleum Institute) para cada uso particular. (11B, 1998 ).

La presentación de las varillas convencionales corresponde a una longitud de 25 ft y los diámetros oscilan entre 3/4" y 1 1/4" con un incremento de 1/8" para cada referencia inmediatamente continua. En campos Colombianos puede encontrarse comúnmente, varilla grado D y otras variaciones especiales, como ELECTRA y T66XD de Weatherford, caracterizadas por soportan altos torques; y varillas UHS (*Ultra High Strength*) de Tenaris.

Varillas No Convencionales: Corresponden, como su nombre lo indica, a varillas diseñadas partiendo de adaptación a un diseño particular que busca solucionar eventos asociados a otras clasificaciones. Este grupo a su vez, se subdivide en grupos particulares, que se describen a continuación.

□ Varillas Continuas: sarta continua de varillas libre de uniones, juntas o acoples. Para su almacenamiento, manipulación y transporte, se requiere la utilización de carretes de gran tamaño; los operadores o personal requerido para su operación debe contar con el entrenamiento adecuado, pues requieren de equipos particulares para instalación/desinstalación y soldadura. Estas varillas pueden ser redondas o semielípticas.

A continuación se muestran los tipos más comunes existentes en el mercado:

### Ilustración 3 - Tipo de Varilla y Material

Tipo de Varilla	Material
Corod DR	AISI 1536 Aleación de Ni- Cr
Corod DER	AISI 4120 Aleación de Ni-Cr-Mo
COROD DWR	AISI 4320 Aleación de Ni-Cr-Mo
COROD SER	AISI 4120 Aleación de Ni-Cr-Mo
COROD SWR	AISI 4320 Aleación de Ni-Cr-Mo
PROROD 620C	AISI 1536 Aleación de Ni-Cr
PROROD 780 M	AISI 4120 Aleación de Ni-Cr-Mo
PROROD 750 N	AISI 4320 Aleación de Ni-Cr-Mo
PROROD 960M	AISI 4120 Aleación de Ni-Cr-Mo
PROROD 970N	AISI 4330 Aleación de Ni-Cr-Mo

De la varilla continua, las referencias COROD (fabricadas por Weatherford), de acuerdo con el diámetro pueden denominarse de manera particular, así:

### Ilustración 4 - Diámetro de Varilla y Denominación

Diámetro	Denominación
13/16"	3
7/8"	4
1"	6
1 1/8"	8.5

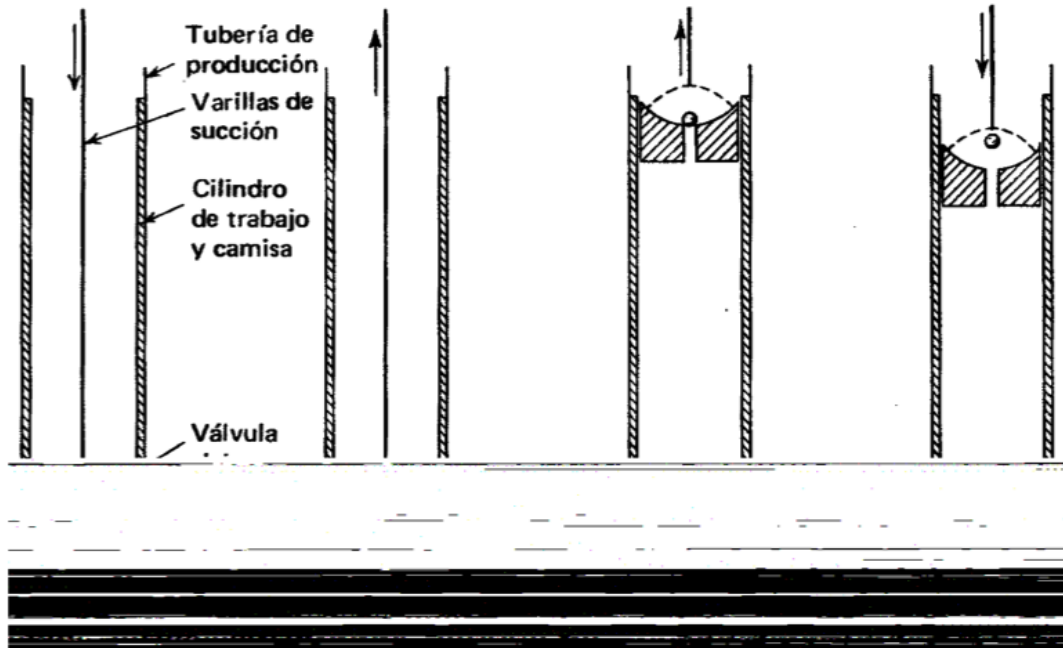
#### 1.3.6 Mecanismo de Extracción

A continuación se describen las principales etapas del ciclo de bombeo mecánico por sarta de varillas:

- El émbolo desciende: El fluido se mueve hacia arriba a través de una válvula viajera que está abierta, a su vez el peso de la columna de fluido que permanece en la tubería de producción es soportado por una válvula estacionaria, que al tiempo está cerrada.
- El émbolo asciende: La válvula viajera se cierra, y al momento la carga asociada al fluido se transfiere a las varillas. La válvula estacionaria se abre tan pronto se da el cambio de presión (presión zona baja supera la presión en zona alta).
- El émbolo asciende cerca de la parte superior de la carrera: la válvula estacionaria, está abierta y permite que se lleve la producción hacia la tubería de conducción.
- El émbolo desciende, cerca de la parte superior de la carrera: La válvula estacionaria está cerrada por el aumento de presión que resulta de la compresión

de los fluidos en el volumen entre las válvulas (estacionaria y viajera). La válvula viajera ha permanecido abierta, pero este estado depende del porcentaje de gas libre en los fluidos entrampados, ya que la presión debajo de la válvula debe exceder a la presión de arriba, es decir, la presión debida a los fluidos en la tubería de producción arriba del émbolo, antes de que la válvula viajera se abra. (NIND, 2015)

**Ilustración 5 - Etapas Extracción de Crudo**



(NIND, 2015)

#### 1.4 CONCLUSIONES OBJETIVO 1

La sección detalla y desarrolla a cabalidad, todas las partes relevantes de la varilla continua para bombeo mecánico de pozos, mediante su descripción detallada, figuras y componentes necesarios y relevantes de la misma, con el fin de determinar los fundamentos de los tratamientos temáticos que siguen a continuación.

## 2 ANÁLISIS DE FALLAS PARA VARILLAS CONTINUAS

### 2.1 OBJETIVO

Caracterizar los modos de falla que afectan la varilla continua para bombeo mecánico de pozos antes y durante su operación.

### 2.2 INTRODUCCIÓN DE CAPÍTULO 2

La siguiente sección, suministra los conceptos generales de Falla, Modo y Mecanismo de Falla, y la identificación de los mismos para el particular caso de la varilla continua para bombeo mecánico de pozos.

#### 2.2.1 Falla

Una falla se define como una desviación en las características de un material o un equipo que ocasiona la pérdida parcial o total de su funcionalidad.

Se define la Causa de Falla como las acciones que condujeron a que se presentara el evento. Estas causas pueden estar asociadas al diseño, las especificaciones, la instalación, la operación o las actividades de mantenimiento.

En la teoría, las fallas presentan distintas clasificaciones, relacionadas muchas veces con el tipo de industria en la cual se presentan o con los niveles de criticidad que represente.

De acuerdo con OREDA (Gutiérrez, 2015), las fallas se dividen en los siguientes tipos:

- Desconocidas
- Incipientes
- Limitantes
- Críticas

De acuerdo con la metodología FMEA, las fallas son de 2 tipos:

Esporádicas: estas fallas corresponden a una desviación por fuera del rango aceptable de operación normal, que algunas veces lleva todo el proceso a detenerse. Son eventos por lo general poco frecuentes y no relacionados entre sí.

Crónicas: corresponden a la desviación dentro de un rango aceptable de operación normal. Son eventos relativamente frecuentes que pueden afectar las operaciones en el corto plazo.

### 2.2.2 Mecanismo de Falla

Proceso físico, químico u otro que ha conducido un deterioro hasta llegar al estado de falla.

### 2.2.3 Modo de Falla

Es la forma por la cual una falla es observada, describe de forma general cómo ocurre y su impacto en la operación del equipo. Efecto por el cual una falla es observada en un ítem fallado, hechos que pueden haber causado un evento de falla.

### 2.2.4 Análisis de Falla como estrategia en la gestión del Mantenimiento

A través del análisis de los cuatro niveles de mantenimiento, son comprensibles los requisitos mínimos, necesarios para que la estrategia de mantenimiento diseñada para un activo/planta particular sea efectivo.

La ilustración a continuación, muestra las categorías jerarquizadas de los tópicos del mantenimiento.

**Ilustración 6 - Niveles y categorías del mantenimiento bajo enfoque sistémico**



A continuación, una breve descripción de los niveles mostrados.

El nivel instrumental está compuesto por los elementos reales necesarios para que el área de mantenimiento funcione. Dichos elementos, denominados instrumentos de mantenimiento, son de orden real y entre los más relevantes se pueden anunciar los básicos y los avanzados (Mora L. A., 2009).

El nivel operacional comprende todas las posibles acciones por realizar en el mantenimiento de equipos por parte del oferente, a partir de las necesidades y los deseos de los demandantes (Mora L. A., 2009).

El nivel táctico corresponde a las acciones de mantenimiento aplicadas de forma particular; se realizan para alcanzar un propósito siguiendo unas normas. En este nivel es posible ubicar el reconocimiento de los modos y mecanismos de falla.

El campo estratégico está compuesto por las metodologías que se desarrollan con el fin de evaluar el grado de éxito alcanzado con las tácticas desarrolladas; esto implica el establecimiento de índices, rendimientos e indicadores que permitan medir el caso particular con otros de diferentes.

#### **Ilustración 7 - Nivel Estratégico - CMD**



El análisis de falla, sea cual sea la técnica aplicada para su ejecución, permite establecer las herramientas necesarias para la determinación de los objetivos del mantenimiento para cada grupo de activos.

Entre las ventajas que ofrece el reconocimiento pleno de un evento de falla están el reconocimiento de las situaciones donde se necesita un análisis sistemático y objetivo, aplicar técnicas prácticas para la solución confiable que permita mitigar el riesgo de repetición de un evento similar.

El análisis de causa raíz juega un papel muy importante en la búsqueda de la reducción de la frecuencia de eventos de falla en los pozos con levantamiento artificial.

Por definición el índice de la frecuencia de las fallas es el número total de las fallas que ocurren por pozo, por año. Aquellos pozos que presenten altos índices de frecuencia de falla pueden ser marginados y entre las alternativas del manejo de estos se encuentra la clausura del mismo.

### 2.2.5 Fallas en Varillas de Bombeo Mecánico de Pozos

La mayoría de las fallas asociadas con los sistemas de levantamiento artificial puede ser atribuida a uno de los tres componentes principales del fondo del pozo, la bomba del fondo, varilla de bombeo o sarta de la tubería. Cualquiera sea el evento casi siempre es catalogado como catastrófico dado que requerirá el paro del pozo, por ende de la producción y por otra parte, el reemplazo de estos componentes siempre demanda cuantiosos recursos.

Muchos de los eventos asociados al bombeo con sarta de varillas, han sido identificados a través del tiempo en las juntas o acoples entre varillas, lo anterior, asociado a las agresivas condiciones de operación a las que estos elementos son sometidos de manera continua. La sarta de varilla continua, libre de puntos de acople, fue diseñada para mitigar este riesgo e incrementar la vida útil de la sarta, reconocida, entre otras cosas, por su alto costo y riesgo operativo. Este tipo de varilla, corresponde a las denominadas varillas continuas.

Los eventos de falla asociados a varilla continua son de alta importancia dado que para dar pronta solución deberá ser retirado todo el sistema y por ende remover toda la varilla con el propósito de hallar el punto exacto de falla, estas actividades incluyen muchas veces la pesca de distintos elementos, lo que puede fácilmente tomar entre 4-7 días, con sus respectivas consecuencias técnicas y económicas.

### 2.2.6 Tipos de Fallas Identificadas

Con el propósito de clasificar los modos de falla de la varilla continua, estas serán clasificadas en Fallas de tipo Mecánico y Fallas de tipo Químico.

#### 2.2.6.1 Fallas de tipo Mecánico

Ocurren cuando el esfuerzo soportado supera la resistencia máxima a la tensión del material. La carga se concentra en un punto específico de la varilla generando la multiplicación de esta alrededor de dicho punto, generando la nucleación de un proceso de agrietamiento.

Los movimientos que conllevan el bombeo mecánico consisten en periodos de carga (ciclos) determinados de acuerdo con la caracterización del pozo (profundidad, presión interna, entre otros aspectos). Cada ciclo sobrelleva la resistencia de las varillas ante diferentes esfuerzos asociados a la aceleración/desaceleración, lo que puede conducir a que el material que conforma la varilla sufra periodos de elasticidad. En el instante en que durante un periodo el límite elástico sea superado, progresiva o súbitamente, es muy posible que comience la nucleación de un proceso de agrietamiento y por ende de falla. Estas fallas serán catalogadas como de tipo mecánico.

A continuación se describen los mecanismos de falla particulares asociados al grupo de fallas en mención:

### **Fallas por Tensión**

Estas fallas se presentan cuando el material de la varilla supera el límite a la tensión. El esfuerzo se concentra en un punto específico a nivel longitudinal y como consecuencia se reduce la sección transversal, es decir el esfuerzo se multiplica en distintos factores de acuerdo con el daño particular. La reducción del diámetro continua hasta que suceda la falla. El proceso de agrietamiento se genera a nivel microestructural y se propaga rápidamente hasta el nivel macro.

**Morfología:** Este tipo de fallas se reconocerán porque el perfil de falla mostrará deformación plástica que causa un fenómeno de encuellamiento en la varilla, la zona de ruptura final corresponde a la zona de menor diámetro y el punto exacto mostrará un tipo de fractura casi frágil en un noventa por ciento (90%) aproximadamente.

### **Fallas por Flexión**

Este tipo de falla está asociado a un buen número de eventos en los pozos que usan varilla convencional, dado que indudablemente los puntos del cuerpo de la varilla que sufren deformación plástica corresponden a un concentrador de esfuerzo susceptible a experimentar otros mecanismos de falla adicionales como procesos corrosivos y adicionalmente causarían posible desalineamiento en los puntos de unión entre varillas. La varilla continua se caracteriza por ser más flexible que la varilla convencional, no obstante, en pozos con desviaciones grandes o cuando se presentan salidas abruptas de gas esto puede generar deformación en la varilla que supera el límite elástico del material, generando a su vez procesos de agrietamiento a nivel microestructural que se revelará progresivamente de forma macro.

**Morfología:** Zonas de alta deformación en el cuerpo de la varilla, que ocasionan la pérdida de rectitud en este. Se evidenciarán fisuras en el lado cóncavo de la flexión

### **Fallas por Fatiga**

Estas fallas son de tipo progresivo, situación que es fácilmente identificable en el perfil de fractura por múltiples marcas paralelas (marcas de playa, chevron u otras); generalmente no presenta deformación plástica significativa e inician en cualquier punto que constituya un concentrador de esfuerzo, en el caso particular de las varillas, discontinuidades micro/macro en superficie o a nivel estructural.

En la sarta de varillas, el esfuerzo de operación es distribuido en iguales condiciones a lo largo del cuerpo de la varilla; las discontinuidades antes descritas,

reducen el área transversal multiplicando los niveles de esfuerzo en dicha zona; se forma la grieta en el borde de la discontinuidad y se propaga perpendicularmente al eje de la varilla; en cada ciclo de carga, la grieta avanza hasta que la reducción del área hace que la varilla no resista las cargas de trabajo.

**Morfología:** La fractura es de características dúctiles y puede presentar bordes a 45°. Las marcas de fractura se observan como huellas paralelas continuas, conducen a la identificación del punto de partida (concentrador de esfuerzo) del proceso de agrietamiento y el progreso de la misma (Wikipedia®, 2015).

### **Fallas por Desgaste Abrasivo**

El desgaste abrasivo corresponde a la pérdida progresiva de masa del cuerpo de la varilla que resulta del contacto, en constante movimiento, entre partículas duras y la superficie de la varilla. En este caso particular este desgaste, comúnmente se presenta por el contacto directo entre la sarta de tubería y la sarta de varilla. La reducción de la sección transversal de la varilla ocasiona la pérdida de la resistencia en tal punto y ocasiona el agrietamiento que conlleva a falla.

**Morfología:** pérdida de redondez de la varilla asociada a la pérdida de masa; pueden presentarse zonas planas a lo largo del cuerpo de la varilla.

El desgaste abrasivo usualmente puede observarse como desviaciones de la geometría original de la varilla. Los patrones de desgaste abrasivo angular indican sartas de varilla que están entrando en contacto agresivamente con la tubería en un ángulo determinado como resultado de ciclos de impacto asociados al proceso de bombeo.

### **Fallas por Desgaste Erosivo**

Estos daños se producen porque los fluidos, líquidos o gaseosos contienen partículas duras y la velocidad de flujo es suficiente para remover el material superficial de la varilla.

**Morfología:** pérdida de redondez de la varilla asociada a la pérdida de masa; las zonas de daño presentan surcos paralelos, asociados al tipo de partículas en contacto con la superficie, si el daño está en estado avanzado podrán observarse zonas planas a lo largo del cuerpo de la varilla.

La forma y el tamaño de las huellas formadas por desgaste erosivo dependen, entre otros aspectos, de la velocidad, el tamaño y el ángulo de impacto de las partículas; de esta forma, si las partículas son de diversas características, las huellas que se forman causarán heterogeneidad en la superficie de la varilla, alterando su geometría en gran manera.

A continuación se muestran los patrones más comunes que revelarán las morfologías particulares asociadas a los tipos de desgaste antes descritos.

Ilustración 8 – Morfologías Comunes para cada tipo de falla de tipo mecánico

#### 2.2.6.2 Fallas de tipo Químico

Al hablar de fallas asociadas a un proceso de desgaste de tipo químico, la referencia corresponde a la presencia de procesos de corrosión, en todas sus formas, que dependerán del tipo de material, el tipo de electrolito en contacto directo y las condiciones operacionales particulares del sistema de levantamiento artificial.

En cualquier caso, la corrosión es un mecanismo que en ambientes como los de fondo de pozo, son casi difíciles de evitar por completo, y de esta manera los esfuerzos se concentran en el control de los procesos de degradación particulares.

El agua presente en los pozos generalmente contiene cantidades considerables de agentes agresivos que desencadenan procesos corrosivos; los materiales muestran distintos comportamientos ante la presencia de estos agentes y el hierro que hace parte de la varillas forma compuestos con estos por medio de un intercambio electrónico conocido como par galvánico.

**Morfología:** En este particular caso la morfología de daño estará asociada al tipo de corrosión que se presente en la varilla y podrá corresponder a una de las clasificaciones descritas a continuación.

**Corrosión Generalizada**, podrá identificarse porque de forma macro, se observará como un desgaste homogéneo. En el caso de las varillas, a pesar de que este tipo de corrosión progresa lentamente, el daño puede afectar rápidamente la resistencia de la varilla dado que la pérdida de material se propaga desde toda la superficie hacia el núcleo de la varilla, disminuyendo el diámetro de la misma.

**Morfología:** con una vista macro, toda la superficie se observa con aspecto áspero y con ayuda de herramientas de magnificación podrán observarse numerosos puntos de degradación sobre la superficie que ocasionan valles y crestas continuos.

**Corrosión Localizada**, la pérdida de material se presenta en áreas puntuales. Para la varilla continua es usual que este tipo de corrosión sea clasificada como *Pitting*. La corrosión localizada progresa rápidamente dado que su mecanismo general es concentrar los agentes agresivos hacia el fondo de daño haciendo que

la relación de tamaños ánodo/cátodo sea más grande al igual que el efecto de daño.

**Morfología:** Este daño se observa como una pérdida de material notablemente localizado, alrededor de este la superficie se encuentra en aparente buen estado y el daño progresa hacia el núcleo de la varilla. El *pitting*, se identifica como un daño tipo “huella de punta de aguja”, con forma redondeada y alta penetración.

### **Fallas por Desgaste Erosivo-Corrosivo**

Este tipo de desgaste se presenta cuando el fluido en contacto con las varillas es de carácter agresivo y adicionalmente lleva partículas con mayor dureza que la superficie de la varilla, lo anterior desencadenan un proceso erosivo.

El desgaste erosivo-corrosivo son fenómenos de desgaste químico/mecánico que actúan en forma sinérgica acelerando el proceso de falla.

acelerada de los materiales

**Morfología:** presentarán morfologías de características descritas en cada uno de los desgastes antes mencionados para desgaste corrosivo y adicionalmente zonas de remoción zonificada de material. Lo anterior puede generar superficies amorfas, con valles y crestas de bordes agudos y lados pronunciados.

#### 2.2.6.3 Concentradores de Esfuerzo

De la clasificación anterior de morfologías para cada uno de los tipos de desgaste, se tiene que los procesos de falla en varilla continua presentan un punto común y es que los puntos de nucleación de procesos de agrietamiento inician en puntos de concentración de esfuerzo micro o macro, visibles o no, en la zona superficial, subsuperficial o interna de la varilla.

Los concentradores de esfuerzo pueden presentarse por cualquier tipo de desgaste, sea mecánico o químico y presentan en común la pérdida de la geometría original de la varilla.

## 1.5 CONCLUSIONES DE OBJETIVO 2

La morfología de daño que se presenta como resultado de cualquier tipo de daño, sea químico o mecánico, evidentemente resultan en una modificación de la geometría original de la varilla; el reconocimiento de las formas que resultan después de la presencia de un mecanismo de degradación resulta de marcada

importancia para determinar el comportamiento de la varilla y la determinación aproximada del *Runlife* (vida remanente), de la misma.

La identificación particular de las morfologías asociadas a la varilla continua, a partir de las cuales se determinan unos niveles de criticidad para clasificar la afectación en la geometría constituyen una forma de identificación más efectiva para la aplicación de planes de inspección efectivos, acortando los tiempos y en general los recursos destinados a estas actividades y aumentando la eficiencia del proceso.

Lo anterior, en el contexto operacional de un pozo y de sus indicadores de mantenimiento, que se revelan en la cuantificación de la Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad, constituyen las herramientas que permiten organizar el ciclo PHVA para la gestión del mantenimiento en la organización que opera los pozos.

### 3 APLICACIÓN DE ENSAYOS

#### 3.1 OBJETIVO 3

#### 3.2 INTRODUCCIÓN DE CAPÍTULO 3

En el capítulo tres, se definen y aplican los mecanismos de evidencia necesarios para más adelante, establecer las variables críticas que determinan los niveles de alarma que el dispositivo para inspección no destructiva.

Lo anterior se ha realizado a partir de la aplicación de la metodología de Análisis de Causa Raíz para varios especímenes reales de varilla continua, de esta manera los criterios serían establecidos según datos ajustados a casos de fallas reales.

#### 3.3 DESARROLLO DE CAPÍTULO 3

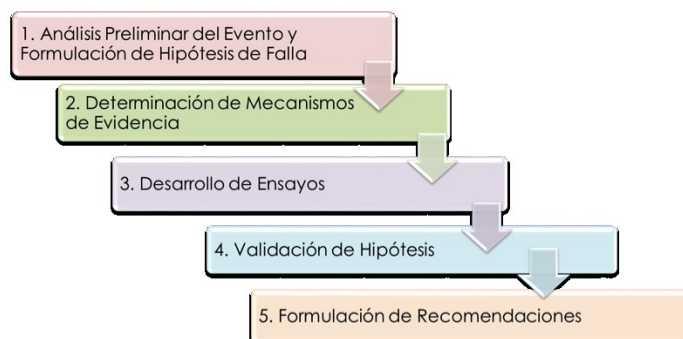
Los resultados, organizados por ensayos aplicados se describen en este capítulo; y las muestras de referencia se presentan a continuación:

#### Ilustración 8 - Identificación de Muestras

<p><b>Varilla Continua Tenaris MMS:</b> Producida en acero aleado AISI 4138 Mod., con cromo-molibdeno y susceptibilidad reducida a la fragilización inducida por hidrógeno (SSC). Normalizada y revenida.</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

La metodología general para análisis de falla se presenta en Ilustración 10. Los mecanismos de evidencia corresponden a los ensayos destructivos y no destructivos programados.

#### Ilustración 9 - Metodología General para Análisis de Causa Raíz aplicada.



Para la determinación de los mecanismos de evidencia necesarios, se ejecutan los siguientes ensayos de acuerdo con las características de cada una de las piezas de estudio. Los ensayos se clasifican en los grupos mostrados a continuación:

## **ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

### **3.4 INSPECCIÓN VISUAL MICRO-MACRO**

Se realiza la inspección visual micro-macro, detallada de las piezas con el fin de evidenciar la presencia de productos de corrosión, grietas, deterioros u otro tipo de discontinuidades.

Esta inspección implica la preparación mecánica, limpieza química de las piezas, dimensionamiento y caracterización de discontinuidades.

### **3.5 ENSAYO DE MICRO Y MACRO DUREZA**

Permite establecer perfiles de dureza longitudinal y transversal, en las piezas con y sin falla; y de esta manera evidenciar o descartar la presencia de esfuerzos mecánicos residuales, graduales o súbitos a partir de diferenciales entre zonas. Lo anterior determinará posibles cambios en las propiedades mecánicas del material o existencia de puntos frágiles que desencadenan eventos asociados a procesos de falla.

Se realiza siguiendo los lineamientos de las normas, de acuerdo a las condiciones de la pieza, *ASTM E-10-12 Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*, *ASTM E18 - 15 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*, *ASTM E384 - 11e1 Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*, *ASTM E140 - 12be1 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness*.

## **CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES METÁLICOS**

### **3.6 ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA**

Se realiza mediante la técnica de Espectrometría de Emisión Óptica (EEO), la cual permite determinar la composición elemental de la aleación que constituye la matriz del material de fabricación de las piezas. Este ensayo se realiza siguiendo los lineamientos establecidos por las normas *E415-08 Standard Test Method for Atomic Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel*.

Se realiza con la finalidad de descartar la inhabilidad del material por diseño frente al medio al que está expuesto.

### 3.7 ANÁLISIS METALOGRÁFICO

Se realiza mediante la técnica de Microscopía Óptica, la cual permite identificar las características micro-estructurales del material de la pieza, el nivel de inclusiones del material y cambios microestructurales generados por los procesos de degradación evidenciados. El análisis se realiza de acuerdo a Las especificaciones descritas en las normas *ASTM E-3-11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*, *ASTM E-7-01 Standard Terminology Relating to Metallography*, *ASTM E45-05e2 Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel* y *ASTM E-407-07e1 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*.

El análisis metalográfico se realiza a probetas provenientes de cortes longitudinales y transversales, en probetas aparentemente libres de daño y en probetas provenientes de piezas falladas. Lo anterior permite validar o descartar que el daño en superficie presente nucleación a nivel microestructural con posterior proyección a nivel macro.

### 3.8 ENSAYO DE TENSIÓN

Permite cuantificar el límite de fluencia, la resistencia a la tensión, el esfuerzo de ruptura y el porcentaje de elongación de las varillas. El ensayo se realizó de acuerdo con la disponibilidad de material para cada pieza y siguiendo los lineamientos establecidos en la norma *ASTM E-8/E8M-11 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.

### 3.9 ENSAYO CHARPY

Se realiza para valorar la capacidad de resistencia del material de las varillas a las cargas de impacto (tenacidad) y determinar su tendencia a la destrucción frágil. El ensayo se realiza siguiendo los lineamientos establecidos en las normas NTC 3353 Siderurgia, Definiciones y Métodos para los Ensayos Mecánicos de Productos de Acero, y *ASTM A370-14 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*.

### 3.10 FRACTOGRAFÍA

Este ensayo se realiza en probetas falladas, para describir el perfil de fractura: presencia de grietas y/o microgrietas, inclusiones, morfología del sustrato, daño

localizado tipo picadura, y trayectoria de la fisura, mediante Microscopía óptica, Microscopía Electrónica de Barrido (*SEM*) y/o Microscopía Cofocal con Reconstrucción 3D.

### 3.11 MICROSCOPIA ÓPTICA

Este ensayo permitió la observación detallada del área de falla a diferentes aumentos, y con complementos específicos pueden ser observadas las características particulares de la zona, discontinuidades o cambios que hayan propiciado el proceso de agrietamiento y que no son percibidos si no bajo ciertas condiciones de observación: contraste de fases, contraste interferencial, microscopía con luz ultravioleta, de fluorescencia, entre otras configuraciones.

### 3.12 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

La microscopía electrónica de barrido o SEM se basa en el principio de la microscopía óptica en la que se sustituye el haz de luz por un haz de electrones, con lo que se consigue la visualización de elementos con un tamaño hasta de 100 Å. Este ensayo permite observar con mayor detalle las características de la microestructura del material que ha sufrido falla.

### 3.13 MICROSCOPIA COFOCAL CON RECONSTRUCCIÓN 3D

Se realiza mediante la aplicación de un microscopio que permite realizar cortes ópticos finos y realizar reconstrucciones en tres dimensiones a partir de cortes seriados. Es decir, permite reconstruir tridimensionalmente la superficie a evaluar, y de esta manera obtener detalles de la fractura que de otra manera no es posible obtener (Microsystems@, 2015).

Mediante la aplicación de la técnica es posible obtener el patrón de daño puntual, y la medición de profundidad de daño, en zonas pequeñas, en donde no es posible aplicar dimensionamiento directo con otros instrumentos.

### 3.14 RESULTADOS



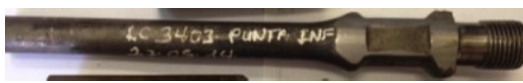

- Inspección Visual

Los resultados del Ensayo No destructivo de Inspección visual realizado se muestra a continuación:

**Ilustración 10 - Inspección Visual de las Muestras – Identificación de Morfología de Falla**

Muestra 1	Muestra 2	
		
<p>Antes de la limpieza se evidencia coloración negra en toda la superficie de la varilla. Después de la limpieza se identifican dos coloraciones sobre la superficie de la varilla en sentido helicoidal.</p>	<p>En la zona del cuello, se observan daños por corrosión tipo picado. La superficie de la pieza se observa rugosa. Se observa una grieta no pasante en sentido longitudinal, como también se presenta una pequeña zona de grietas. En algunas zonas se observa corrosión general, y corrosión de tipo picado zonificado.</p>	<p>Se evidencia la presencia de sólidos de coloración negra. Se observa deformación plástica y remoción mecánica de metal. Hay presencia de viruta metálica y otros contaminantes en la zona correspondiente a los valles de los filetes.</p>
<p>Morfología: Daño localizado por desgaste químico (corrosión localizada)</p>	<p>Morfología: Daño localizado con desgaste químico (corrosión localizada)</p>	<p>Morfología: Daño localizado por desgaste mecánico (Fricción entre superficies)</p>

Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
		
<p>Se evidencia falla completa de la varilla en sentido transversal. Se evidencian micro-grietas en el inicio del labio cortante de la zona de fractura.</p>	<p>Se evidencia falla completa de la varilla en sentido transversal. Se observa una superficie externa lisa. Se observa la presencia de sólidos de difícil remoción y alta adherencia No se evidencia otro tipo de daño mecánico en la superficie del segmento de varilla, excepto la zona de falla pasante.</p>	<p>Se presenta morfología de daño por desgaste químico (fenómenos corrosivos activos) de tipo localizado, de alta densidad. Profundidad de daño máxima identificada: 0,5 mm. Se observa pérdida de material generalizado para la superficie cuadrada (Wrench Square).</p>
<p>Morfología: Deformación plástica localizada (Fractura completa de superficie)</p>	<p>Morfología: plástica localizada (Fractura completa de superficie)</p>	<p>Morfología: Daño localizado por desgaste químico (Corrosión Localizada)</p>
Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8
		
<p>En el cuerpo de la varilla, se evidencia daño por desgaste químico de tipo localizado, de alta densidad; la morfología se observa asimilable a la huella de la punta de una aguja. Profundidad &lt;15mils.</p>	<p>Se evidencia pérdida de material de forma localizada con formas amorfas, bordes irregulares, registrando una profundidad de daño hasta 0.25 mm. Se evidencia daño mecánico por rozamiento con pérdida de material.</p>	<p>Se observa que sobre toda la superficie del cuerpo de la varilla, se presenta corrosión localizada de alta densidad, con profundidad de daño &lt;15 mils.</p>
<p>Morfología: Daño localizado por desgaste químico (corrosión localizada)</p>	<p>Morfología: Daño localizado por desgaste químico (corrosión localizada)</p>	<p>Morfología: Daño localizado por desgaste químico (corrosión localizada)</p>

Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11
		
<p>Se evidencia desgaste de tipo mecánico adhesivo que causa pérdida de la forma cónica original en esta zona. Se observa que el desgaste evidenciado no se presenta de forma uniforme en todo el cuerpo del elemento de interés, sino en dos lados particulares, que a su vez están ubicados aproximadamente a un hemisferio del elemento.</p>	<p>Se evidencia desgaste de tipo mecánico adhesivo que causa pérdida de la forma cónica original de la zona evaluada dado que el espesor en esta zona disminuye, se ocasiona la reducción de la resistencia mecánica, ocasionando agrietamiento en sentido longitudinal. La grieta presenta bordes finos y forma irregular.</p>	<p>Se evidencia desgaste de tipo mecánico adhesivo que causa pérdida de la forma original de la pieza, como resultado del desgaste se produce la pérdida de materia, la subsiguiente disminución de las dimensiones y por tanto la pérdida de tolerancias, de esa forma se origina agrietamiento en el componente.</p>
<p>Morfología: Daño localizado por desgaste mecánico</p>	<p>Morfología: Daño localizado por desgaste mecánico</p>	<p>Morfología: Daño localizado por desgaste mecánico</p>
<p><b>Muestra 12</b></p>		
		
<p>Se evidencia presencia de sólidos de consistencia pastosa y coloración marrón y naranja, de baja adherencia; Morfología de daño por corrosión, con pérdida localizada de material de alta densidad. .</p> <p>Las zonas con pérdida localizada de material se evidencian rugosas, con bordes finos y filosos, de formas indefinidas.</p>		
<p>Morfología: Daño localizado por desgaste químico</p>		

- Ensayo de Dureza Micro-Macro



El ensayo de dureza se realizó en trazados longitudinales, con respecto al eje de la varilla y teniendo en cuenta los parámetros que se indican en la Ilustración 12.

**Ilustración 11 - Condiciones Ensayo de Dureza**

Procedimiento utilizado	ASTM E384-11"Stardard test Method for Knoop and Vickers hardness of materials"
Marcas y Modelos de equipos y accesorios	Shimadzu Tipo M
Carga	200 g
Tiempo	10 s
Temperatura °C	20.1
Humedad Relativa	72%

Los resultados de la medición de dureza se muestra en la Ilustración 13, a continuación:

**Ilustración 12 - Esquema y Resultados Ensayo de Dureza**

Discontinuidad

Cerca de Falla

Lejos de Falla

Muestra	Dureza HB								Muestra	Dureza HV							
	Cerca de falla				Lejos de falla					Cerca de falla				Lejos de la Falla			
1	240	240	244	242	211	220	212	212	7	734	709	734	729	700	698	698	701
	202	204	204	203	213	214	214	210		709	725	709	776	702	700	702	702
2	166	269	166	269	212	210	215	222	8	702	712	743	744	700	687	685	705
	216	259	216	259	21	214	214	210		717	717	766	765	700	702	702	712
3	236	262	255	236	204	204	204	204	9	285	285	285	275	296	285	285	295
	282	243	233	280	217	217	217	217		306	343	343	340	370	306	306	343
4	177	211	233	246	205	229	201	207	10	295	295	285	295	283	275	293	290
	179	215	231	184	227	211	207	208		298	306	370	342	300	342	343	377
5	707	790	700	700	689	701	700	680	11	290	298	290	295	302	285	287	290
	790	707	817	747	690	690	698	700		306	306	310	312	380	377	375	375
6	727	736	708	778	709	700	700	706	12-	388	397	311	314	227	250	234	249
	744	700	709	767	703	702	708	702		387	388	390	391	239	246	250	253

De lo anterior, se tiene que para los segmentos de varilla afectados por fallas, hay cambios importantes en los niveles de dureza superficial del material al establecer la comparación entre las zonas cercanas a las discontinuidades evidenciadas y las zonas aparentemente libres de daño. Lo anterior, permite afirmar que no se tiene uniformidad en dicha propiedad, dado que las diferencias superan un rango de +/- 20 puntos en la escala Brinell (HB).





La variación en los valores de dureza está directamente relacionada con cambios en las propiedades superficiales de los segmentos de varilla, dados por un tratamiento térmico inadecuado y/o la presencia de daño superficial (lo que implica modificación de la geometría original de la varilla).



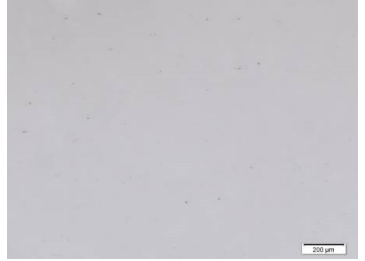



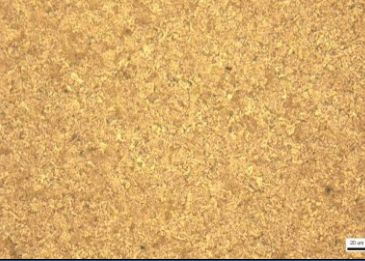
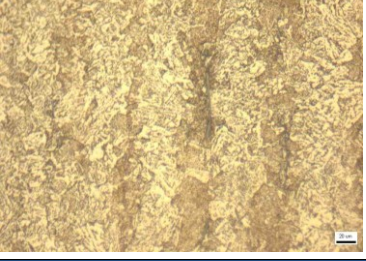
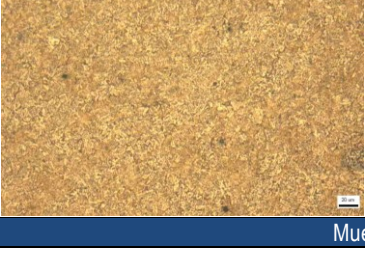
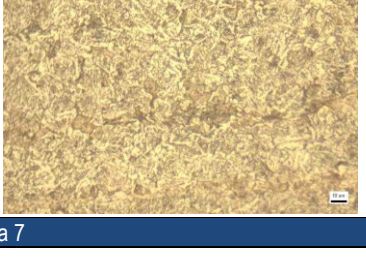
- Análisis Metalográfico.


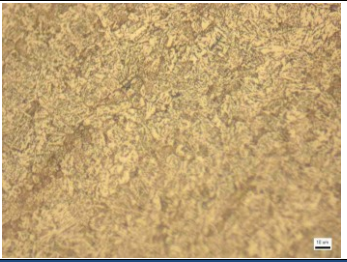

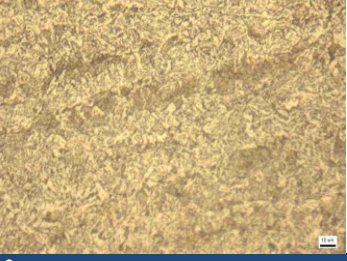





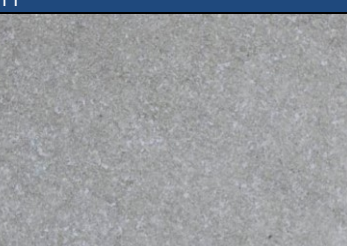
En las Tablas a continuación, se observa el registro fotográfico de inspección micro efectuada a muestras de las varillas, a los aumentos de 100x, 500x, 1000x y 1500x, que se realiza a la varilla (CYTI@, 2015).

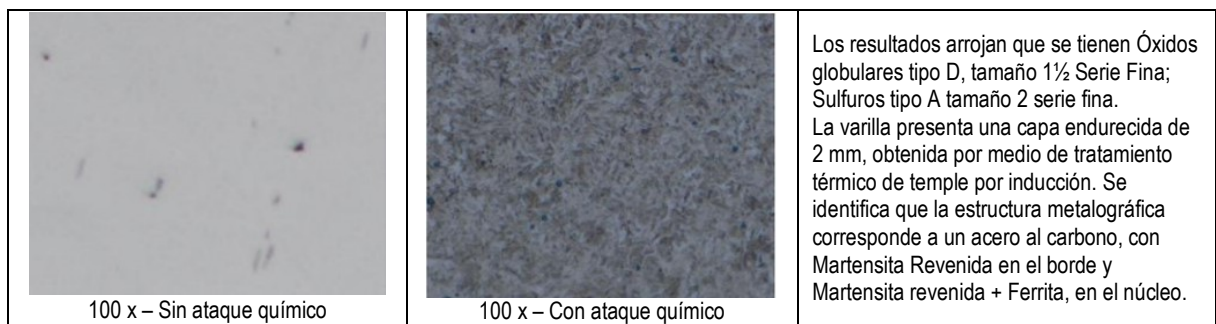
Para el análisis de inclusiones, se eligió el método D de la Norma *ASTM E45 - 13 Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel*.

**Ilustración 13 - Análisis Metalográfico**

Muestra 1		Descripción
		La varilla presenta una capa endurecida de 2 mm, obtenida por medio de tratamiento térmico de temple por inducción. En esta zona, se evidencia una estructura de martensita fina.
50x – Con ataque químico	1500 – Con ataque químico	
		Se halla que sobresalen las inclusiones tipo D (óxidos) con un número estimado de inclusión de la serie gruesa de 2.5 y la serie fina de 1.5; los demás tipos de inclusiones se omiten dado que son menores a dos micras a 100x.
100x sin ataque químico	500x con ataque químico	
Muestra 2		Descripción

 <p>100x con ataque químico</p>	 <p>100x con ataque químico</p>	<p>El acero tiene estructura de un bonificado (temple y revenido), compuesta por martensita revenida a altas temperaturas, se evidencia una microestructura homogénea y presencia de grano de tamaño fino, tamaño 8.</p>
<b>Muestra 3</b>		<b>Descripción</b>
 <p>100x sin ataque químico</p>	 <p>100x con ataque químico</p>	<p>Se observa inclusiones tipo D (óxidos) con un número estimado de inclusión de la serie gruesa de 1 y de la serie fina de 1.0; y del tipo A (sulfuros) con una severidad de la serie gruesa de 0.5.</p> <p>Se presenta una microestructura para los cortes transversal y longitudinal martensita revenida.</p>
<b>Muestra 4</b>		<b>Descripción</b>
 <p>100 x – Sin ataque químico</p>	 <p>1000 x – Con ataque químico</p>	<p>Se observa inclusiones tipo D (óxidos) con un número estimado de inclusión de la serie gruesa de 1 y de la serie fina de 1.0; y del tipo A (sulfuros) con una severidad de la serie gruesa de 0.5.</p> <p>Se presenta una microestructura para los cortes transversal y longitudinal martensita revenida.</p>
<b>Muestra 5</b>		<b>Descripción</b>
		<p>La varilla presenta una capa endurecida, obtenida por medio de tratamiento térmico de temple por inducción. Se identifica que la estructura metalográfica corresponde a un acero al carbono, con Martensita Alto Carbono Revenida en el borde y Martensita revenida + Ferrita, en el núcleo</p>
<b>Muestra 6</b>		<b>Descripción</b>
		<p>La varilla presenta una capa endurecida, obtenida por medio de tratamiento térmico de temple por inducción. Se identifica que la estructura metalográfica corresponde a un acero al carbono, con Martensita Alto Carbono Revenida en el borde y Martensita revenida + Ferrita, en el núcleo.</p>
<b>Muestra 7</b>		<b>Descripción</b>

		<p>El segmento de varilla presentó una capa endurecida, obtenida por medio de tratamiento térmico de temple por inducción. Se identifica que la estructura metalográfica corresponde a un acero al carbono, con Martensita Alto Carbono Revenida en el borde y Martensita revenida + Ferrita, en el núcleo.</p>
<b>Muestra 8</b>		<b>Descripción</b>
		<p>El segmento de varilla presentó una capa endurecida, obtenida por medio de tratamiento térmico de temple por inducción. Se identifica que la estructura metalográfica corresponde a un acero al carbono, con Martensita Alto Carbono Revenida en el borde y Martensita revenida + Ferrita, en el núcleo.</p>
<b>Muestra 9</b>		<b>Descripción</b>
 <p style="text-align: center;">100x sin ataque químico</p>	 <p style="text-align: center;">1000 x – Con ataque químico</p>	<p>Se observa inclusiones tipo D (óxidos) con un número estimado de inclusión de la serie gruesa de 1 y de la serie fina de 1.0; y del tipo A (sulfuros) con una severidad de la serie gruesa de 0.5.</p> <p>Se presenta una microestructura para los cortes transversal y longitudinal martensita revenida.</p>
<b>Muestra 10</b>		<b>Descripción</b>
 <p style="text-align: center;">100 x – Sin ataque químico</p>	 <p style="text-align: center;">100 x – Con ataque químico</p>	<p>Se observa inclusiones tipo D (óxidos) el tipo de inclusión D con un número estimado de inclusión de la serie gruesa de 0.5 y la serie fina de 1.0.</p> <p>Se presenta una microestructura de martensita revenida.</p>
<b>Muestra 11</b>		<b>Descripción</b>
 <p style="text-align: center;">100 x – Sin ataque químico</p>	 <p style="text-align: center;">100 x – Con ataque químico</p>	<p>Se observa el tipo de inclusión D (óxidos) con un número estimado de inclusión de la serie gruesa de 0.5 y la serie fina de 0.5 y inclusiones de tipo A con un número estimado de la serie gruesa de 0.5</p> <p>Se presenta una microestructura de Martensita revenida</p>
<b>Muestra 12</b>		<b>Descripción</b>



- Ensayo de Tensión

Los valores de Límite Elástico, Resistencia a la Tensión, Esfuerzo de Rotura y Elongación para la varilla y los coupling, fueron determinados de acuerdo a la norma ASTM E8/E8M-11 y los resultados se muestran en las Tablas a continuación.

**Ilustración 14 - Condiciones Ensayo de Tensión**

Temperatura	23°C
Humedad	52%
Velocidad	6.0mm/min

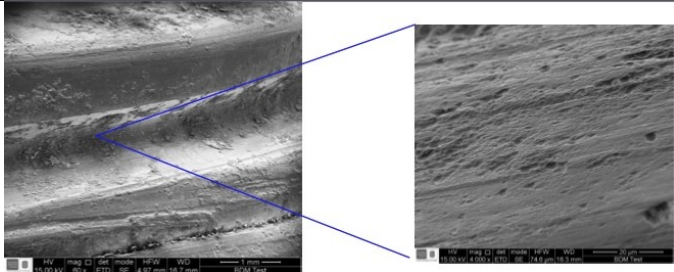
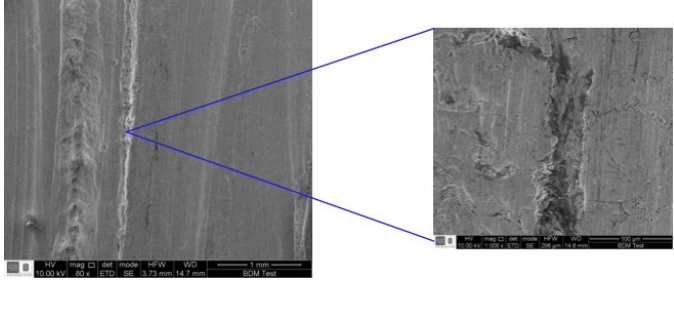

**Ilustración 15 - Resultados Ensayo de Tensión**

Propiedad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra Referencia
Límite de Fluencia, MPa (min)	117190	119890	127488	135900	120022	122346	137240
Resistencia a la tensión, MPa (min)	143132	145670	141846	147793	140589	143054	157060
Esfuerzo de Rotura, Mpa	85117	88120	89900	89760	87260	88200	89750
Porcentaje de Elongación en 50.8 mm (min)	16	19	21	22	18	17	18
Porcentaje de reducción de área, Z	45	62	69	70	69	70	68
Propiedad	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11	Muestra 12	Muestra Referencia
Límite de Fluencia, MPa (min)	122135	118120	122267	119290	127280	122980	137240
Resistencia a la tensión, MPa (min)	142420	139110	149969	144130	145770	144604	157060
Esfuerzo de Rotura, Mpa	89160	88240	89750	86220	87260	19	89750
Porcentaje de Elongación en 50.8 mm (min)	19	19	15	17	19	18	18
Porcentaje de reducción de área, Z	70	68	49	45	62	47.21	68

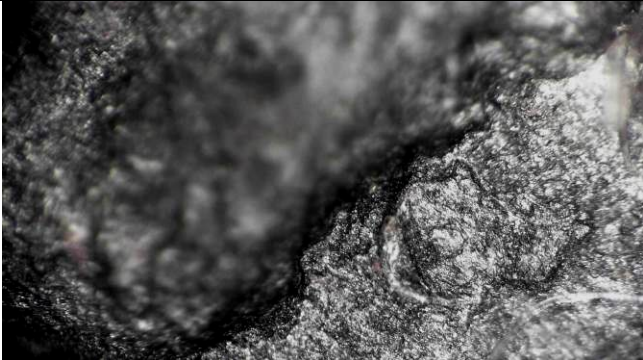

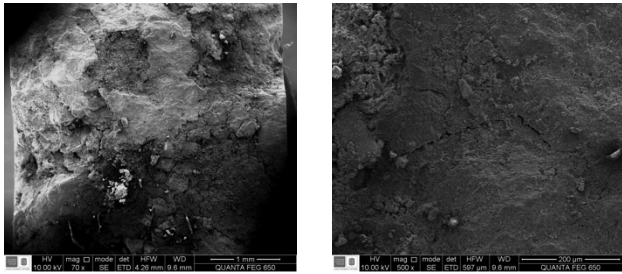
- Fractografía

En las Tablas a continuación, se presentan los resultados de la Inspección efectuada a la superficie de la zona de falla, mediante Microscopia Electrónica de Barrido.

**Ilustración 16 - Fractografía**

	<p><b>Muestra No.1</b></p> <p>El análisis microscópico, permite observar que las zonas correspondientes al paso de la rosca, aparentemente libres de daño e incrustamiento de metal, presentan remoción localizada de material de forma redondeada y alta densidad.</p>
	<p><b>Muestra No.2</b></p> <p>En el análisis microscópico, se observa la presencia de huellas lineales en sentido radial de desgaste mecánico.</p> <p>Se observa que se presentan pequeñas microgrietas en sentido multidireccional, lo que a su vez originan grietas de tipo frágil a mayor escala, de apariencia rugosa y forma irregular.</p>
	<p><b>Muestra No.3</b></p> <p>En la fotografía se muestran las etapas del progreso de falla:</p> <p>En la zona de inicio de falla se evidencia una superficie lisa, brillante, con deformación apreciable, características que corresponden a una fractura de tipo dúctil.</p> <p>La zona de progreso de falla se muestra rugosa y corresponde aproximadamente al 80% del total de la superficie de fractura, presenta características de fractura tipo frágil.</p> <p>Finalmente la zona de ruptura final se observa lisa y como fractura de cara plana (perpendicular al máximo esfuerzo aplicado) y de corte a un ángulo de 45o.</p> <p>A mayores aumentos, la zona de Ruptura Final:</p>

	<p>En ambas evidencias fotográficas se permite evidenciar labios cortantes, los cuales se caracterizan por ser la zona final de ruptura de la pieza. Este tipo de morfología está acompañada de una zona deformada plásticamente y una superficie irregular.</p>
	<p><b>Muestra No.4</b></p> <p>En la zona de inicio de falla se evidencia como un punto pequeño de concentración de esfuerzos (discontinuidad en la superficie exterior).</p> <p>La zona de progreso de falla se muestra rugosa y corresponde aproximadamente al 80% del total de la superficie de fractura, presenta características de fractura tipo frágil.</p> <p>La zona de ruptura final se evidencia lisa y como fractura de cara plana (perpendicular al máximo esfuerzo aplicado) y de corte a un ángulo de 45o.</p> <p>A mayores aumentos, la fractografía nos permite evidenciar el detalle del punto de concentración de esfuerzos donde inicio la falla, se observan marcas de avance de la grieta alrededor del punto de interés. La zona presenta una apariencia irregular y rugosa; puede observarse que hay presencia de microcavidades que hacen parte de la microestructura del material ubicadas en la zona donde inicia el progreso de la falla.</p>
	<p><b>Muestra No.5</b></p> <p>En las micrografías se observa la formación de micro-pittings asociado a una degradación superficial la cual ocasiona pérdida de las propiedades mecánicas originales y a partir de esta condición se presenta micro-agrietamiento de tipo frágil, ramificado e irregular.</p> <p>Por otra parte, se observa de las zonas bajas y altas en los pittings, correspondientes a zonas anódicas para las zonas bajas y catódicas para las zonas altas.</p>

	<p>Muestra No.6</p> <p>Se observa la formación de micro-pittings asociado a una degradación superficial la cual ocasiona pérdida de las propiedades mecánicas originales y a partir de esta condición se presenta micro-agrietamiento de tipo frágil, ramificado e irregular.</p>
	<p>Muestra No. 7</p> <p>En las micrografías se observa la formación de productos de corrosión en la superficie de la varilla. Por otra parte, se observa la formación de puntos de nucleación primeras fases de los procesos de corrosión.</p> <p>Se evidencia que se presenta una degradación por corrosión localizada que ocasiona daño con formas redondeadas, de bordes definidos y fondos lisos.</p>
	<p>Muestra No. 12</p> <p>Se evidencia que se presenta una degradación que ocasiona pérdida de las propiedades mecánicas originales y a partir de esta condición se presenta microagrietamiento de tipo frágil, ramificado e irregular.</p>

## 4 DEFINICIÓN DE VARIABLES CRITICAS

### 4.1 OBJETIVO 4

El objetivo de este capítulo es definir a partir del análisis de las causales de falla que ocasionaron eventos catastróficos reales, el comportamiento de las variables monitoreables y que el dispositivo reconozca al realizar la inspección no destructiva. De esta manera se contribuye a la programación efectiva de las labores de mantenimiento sobre cada lote de varilla cuando esta salga o entre al pozo productor.

### 4.2 DESARROLLO DE CAPITULO 4

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos aplicados, se establecen, las evidencias que descartan o validan las hipótesis planteadas en la metodología de análisis de causa raíz para determinar la incidencia de los modos de falla en los eventos presentados que constituyen eventos reales y que resultaron catastróficos para las empresas propietarias de cada una de las muestras.

Las hipótesis planteadas fueron:

#### Hipótesis 1. Material Fuera de Especificación

Los ensayos de metalografía, composición química y resistencia mecánica del material antes del evento de fallo, satisfacen los requerimientos definidos por el fabricante. En consecuencia, esta hipótesis se descarta como una posible causal de la falla.

#### Hipótesis 2. Esfuerzos Térmicos asociados a fuerzas externas

Los resultados obtenidos de los análisis aplicados, no presentan evidencia de daño alguno que revele la acción de esfuerzos térmicos asociados a fuerzas externas u operativas que tengan relación directa con la causal de la falla de los elementos en estudio.

En virtud de lo anterior, la hipótesis de esfuerzos Térmicos se descarta como una posible causal de la falla.

#### Hipótesis 3. Procesos de Construcción Inadecuados

En primer lugar, se establece que en el cincuenta por ciento de las muestras evaluadas, se presenta un tratamiento térmico de endurecimiento por inducción, cuya capa obtenida presenta buena homogeneidad de dureza antes de los eventos de falla y que los valores estén dentro del rango esperado. Lo anterior

permite deducir que las varillas se encuentran dentro de lo esperado con respecto a los tratamientos térmicos aplicados dentro del proceso de construcción.

Como soporte adicional, el análisis metalográfico permitió observar que se presenta martensita fina como microconstituyente principal, lo que indica que el enfriamiento posterior al tratamiento térmico aplicado se presentó de manera controlada y bajo los estándares esperados.

Por lo anterior, la hipótesis Procesos de Construcción Inadecuados, se valida como una posible causal de la falla.

#### Hipótesis 4. Impacto y desgaste por deslizamiento

El ensayo de inspección visual micro-macro y la fractografía, permitió evidenciar marcas de daño mecánico en las muestras de varilla, posiblemente ocasionadas por el contacto directo de un tercero o durante los procesos de transporte, montaje, almacenamiento y/u operación. Lo anterior ocasiona concentradores de esfuerzo que irrumpe la homogeneidad de la estructura cristalina del material y por ende de las características mecánicas de la pieza.

La inspección visual permitió evidenciar también que en las muestras de varilla se indujo el fenómeno denominado *Galling* (desgaste por rozamiento). Lo anterior puede presentarse con múltiples orígenes, impacto en fondo de pozo, contacto directo con rocas o elementos con mayor dureza que la superficie de la varilla, roce de la varilla con *tubing*, y otros procesos que a su vez pueden ser resultado de procesos de montaje inadecuado movimiento de tierras y/o presencia de contaminantes entre las superficie *tubing*/varilla.

El proceso de desgaste mecánico causa el aumento del coeficiente de fricción entre las superficies involucradas, de forma suficiente para requerir una fuerza de movimiento relativo mayor entre estas lo que resulta en la modificación de la geometría original de las varillas.

Durante la Inspección visual se evidenció que la superficie de las varillas testigo de los diferentes eventos de fallo, se encuentran con pérdida localizada de material, sea por deformación plástica o por corte, mostrando guías asimilables a surcos con ángulos de desgaste diferentes en distintas zonas. Lo anterior muestra el sentido en que se desarrolló el proceso de desgaste superficial.

Por otra parte, la fractografía permitió observar que aunque el desgaste puede desarrollarse por un proceso de daño progresivo, finalmente los eventos de fallo se presentan de forma súbita, lo que resulta catastrófico para las actividades de mantenimiento correctivo normales de las empresas, pues esto necesariamente

requiere el paro de la producción en el pozo afectado. Lo anterior se evidencia en la presencia de grietas de tipo frágil en la zona de daño.

Se establece que en las varillas fallas, se presenta baja homogeneidad de los valores de dureza, evidenciada en diferenciales que superan ampliamente un rango de +/-20 puntos HB (Dureza Brinell) y/o de +/-5 HRc (Dureza Rockwell) entre mediciones. Los diferenciales de dureza altos son evidencia de que en las varillas se ha presentado un proceso de impacto que ha dejado marcas sobre la superficie, que a su vez son considerados perjudiciales para la integridad de la varilla ya que estos son considerados como potenciales concentradores de esfuerzo.

En virtud de lo anterior, la hipótesis Impacto y desgaste por deslizamiento, se valida como causal física de eventos de falla en las varillas.

#### Hipótesis 5. Corrosión

Los resultados de la inspección micro-macro realizada en algunas varillas, muestran suficiente evidencia de deterioros de tipo picado, de alta magnitud de profundidad y alta densidad, que obedecen a un proceso de corrosión severo.

La inspección micro realizada mediante Microscopía Electrónica de Barrido pone de manifiesto una morfología de daño, que permite establecer con claridad suficiente su incidencia en la reducción paulatina de la resistencia mecánica del material, puesto que muestra en su primera etapa la aparición de microfisuras que actúan como difusores de grietas y que a su vez reducen de manera gradual el área neta de la varilla; ambos fenómenos actúan de manera simultánea y nociva en la integridad mecánica del elemento estructural y que puede conllevar a su falla súbita.

De acuerdo con lo anterior, la hipótesis Procesos de Corrosión se valida como posible causa directa de falla

#### CRITERIO DE INSPECCIÓN

Se requiere realizar el monitoreo de los cambios físicos que se presenten en la varilla como resultado de la degradación mecánica y/o química.

Variable a Monitorear: Geometría

Alarmas: Discontinuidades volumétricas

### 4.3 CONCLUSIONES DE CAPITULO 4

La validación de las hipótesis 4 y 5, dada la condición física de las piezas consideradas en el estudio, permiten afirmar que:

- Los eventos de falla son ocasionados por la existencia de discontinuidades superficiales que modifican la geometría original de la varilla, ya sea su origen de tipo químico o mecánico, y que reducen las propiedades mecánicas originales del diseño de la varilla (evidenciado en la disminución de los valores límites en el ensayo de tensión).
- Las varillas que presentan endurecimiento por inducción, asociado a los procesos de diseño, presentan mayor grado de afectación en las propiedades superficiales.
- Las condiciones anteriores, en presencia de los esfuerzos operacionales normales a los que es sometida la varilla, ocasionaron agrietamiento micro y macro estructural a partir de las discontinuidades evidenciadas, este agrietamiento se difundió hasta generar una condición de la reducción de la integridad mecánica de la varilla de pozo hasta conducir a un evento de falla súbito.

## 5 DISEÑO FUNCIONAL

### 5.1 OBJETIVO 5

El presente capítulo describe el diseño funcional del dispositivo para inspección no destructiva de varilla continua, con base en la morfología de daño evidenciada y descrita en los capítulos anteriores.

### 5.2 INTRODUCCIÓN DE CAPITULO 5

A partir del análisis de los diferentes ensayos destructivos y no destructivos, para efectuar análisis de causa raíz de falla en las distintas muestras de varilla continua provenientes de pozos con características diferentes de formación y producción, se busca describir la idealidad de las características funcionales del dispositivo para inspección no destructiva de varilla continua que permitan monitorear en tiempo real y para toda la varilla (sin importar su longitud), el estado superficial de la misma y determinar los cambios geométricos que según los resultados de los ensayos de tensión, reducen las propiedades mecánicas del activo.

### 5.3 DESARROLLO DE CAPITULO 5

Factor funcional: Cumple con las necesidades que requiere el consumidor.

Las operadoras, extractoras de hidrocarburos por bombeo mecánico, requieren que el dispositivo de inspección, sea de tipo no destructivo, para que este pueda ser usado en cualquier etapa de la vida útil de la varilla continua.

El dispositivo deberá ser parte de una solución integral para el monitoreo del estado físico de la varilla por medio de unidades de monitoreo remoto que ofrezca al inspector el mejoramiento de la seguridad en el desarrollo de sus actividades. El sistema debe contar con una plataforma para la gestión de los históricos de monitoreo del estado superficial.

El costo del equipo debe equilibrarse con el beneficio que se espera del mismo. Lo anterior tiene que ver con

Factor de uso: El producto debe ser simple y fácil de usar.

El dispositivo deberá llevar en su electrónica la información que le permitirá realizar los cálculos internos para determinar el grado de afectación en las propiedades mecánicas del material de las varillas antes de un evento de fallo.

Lo anterior minimiza el riesgo que ocasiona la dependencia de los criterios personales de cada inspector, a partir de la evaluación cualitativa y cuantitativa del estado superficial de la varilla y a su vez de valores de profundidad o forma de las discontinuidades que pueden reducir notablemente las propiedades mecánicas de la varilla.

Por otra parte, el manejo del equipo deberá ser sencillo, hablando del manejo físico. Lo anterior, asegura que varios perfiles se adapten a dicho manejo (técnicos, tecnólogos, profesionales, especialistas) y no limitan la consecución de perfiles específicos para su aplicación.

Ahora, la interpretación de los resultados, si deberá ser realizada por personal con las competencias que aseguren la correcta formulación de acciones correctivas y/o preventivas.

#### 5.4 CONCLUSIONES DE CAPITULO

Para cumplir con el objetivo propuesto, el diseño del equipo deberá incorporar la electrónica necesaria para monitorear “In Situ”, por intervalos periódicos determinados por el inspector, el estado superficial de la varilla continua.

Se debe considerar que el monitoreo realizado, minimice los riesgos asociados a discontinuidades que afecten la calidad superficial de la varilla y con ello planear técnicas de contingencia “a tiempo”, que se deberán llevar a cabo para cumplir con la normatividad relacionada, disminuyendo al máximo el riesgo de eventos catastróficos con consecuencias en la seguridad de las personas, el medio ambiente, la producción y/o la imagen corporativa.

En resumen, el dispositivo deberá presentar las siguientes características:

##### 5.4.1 De las características Físicas

La características físicas externas deberán presentar resistencia suficiente ante condiciones adversas de: temperatura ambiental, humedad relativa, pluviosidad, velocidad del viento y dirección del viento. Lo anterior, considerando que por lo general las condiciones medioambientales de las zonas donde se encuentran los pozos para extracción de hidrocarburos se consideran por ser adversas en los ítems antes nombrados.

El material que estará en contacto con diferentes partes mecánicas en cabeza de pozo, deberá presentar buena resistencia a temperatura superficial de la varilla o u otras con las que pueda estar en contacto durante su instalación y puesta en macha.

#### 5.4.2 De la Estructura Funcional

El dispositivo deberá contar con un software que permite configurar el equipo, descargar información, conocer el estado actual del mismo y generar el reporte del estado del sistema varilla continua para evaluación de resultados en tiempo real y/o en periodos posteriores.

##### 5.4.2.1 Confiabilidad:

Que el dispositivo tenga una vida útil acorde con los costos de adquisición, manejo y mantenimiento del mismo.

##### 5.4.2.2 Continuidad:

El dispositivo deberá funcionar con detenciones determinadas por el inspector de acuerdo con su concepto técnico, no predeterminadas.

## 6 CONCLUSIONES

### 6.1 OBJETIVO 6

Presentar los principales resultados.

### 6.2 CONCLUSIONES GENERALES

#### 6.2.1 Del Diseño del Dispositivo para Inspección No Destructiva

El presente proyecto ha buscado avanzar en la construcción de un prototipo para inspección no destructiva de varilla continua que permita contar con un proceso de inspección basado en el análisis de las morfologías de falla asociadas a los tipos de desgaste particulares de estos activos, que por sus características físicas y mecánicas particulares constituyen uno de los principales actores en la actividad de sustracción mecánica de hidrocarburos; lo anterior, para mitigar los eventos de falla, a partir de un proceso de planeación y programación del mantenimiento, en forma conjunta y analítica entre datos cualitativos y cuantitativos, intensificando profundamente estos últimos, y realizando un proceso integral de mantenimiento planeado.

El dispositivo será un sistema de adquisición continua de datos para la totalidad de las características físicas de la varilla continua, independiente de su longitud y estado general.

El desarrollo de este equipo parte del requerimiento de registrar todas las características superficiales de la varilla continua en sitio, en forma directa e instantánea (condición en movimiento), para establecer la influencia de las condiciones mecánicas en la capacidad de resistencia general y definir los comportamientos de la variable “geometría” para determinar el estado general del activo

## BIBLIOGRAFÍA

**11B, Spec. 1998 .** *Specification for Sucker Rods.* [ed.] Edición 26. s.l. : AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API), 1998 .

**AKACS, Tabor. 1993.** *Sucker-Rod Pumping Manual, PennWell Books.* Tulsa : No Especifica, 1993.

**CYTI@. 2015.** Análisis Metalográfico. *CYI.* [En línea] 20 de 11 de 2015. [Citado el: 20 de 11 de 2015.] [http://cyti.com.mx/analisis\\_metalografico.asp](http://cyti.com.mx/analisis_metalografico.asp).

**Díaz, Matalobos - Ángel. 1992.** *Confiabilidad en mantenimiento.* Caracas : Ediciones IESA, C.A., 1992. pág. 110. ISBN: 980-271-068-2.

**Duffuaa, Salih O., Raouf, A. y Campbell, John Dixon. 2000.** *Sistemas de Mantenimiento. Planeacion y control.* Mexico : Editorial Limusa, 2000. 968-18-5918-9.

**ESReDA. 2001.** *Handbook on Maintenance Management.* Hovik : Det Norske Veritas, 2001. 8251502705.

**Forcadas, Jorge. 1983.** *Estadística aplicada a los sistemas & Confiabilidad en los sistemas.* Medellín : Revista Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos, 1983. Vol. 1.

**Halpern, Siegmund. 1978.** *The Assurance Sciences: An Introduction to Quality Control and Reliability.* New Jersey City : Editorial Prentice Hall, Inc Professional Technical, 1978. ISBN: 0130496014.

**Hanke, John E. y Reitsh, Arthur G. 1996.** *Pronósticos en los Negocios.* México : Prentice Hall, 1996. 9702607590.

**Kelly, Anthony y Harris, M. J. 1998.** *Gestión del Mantenimiento Industrial.* [ed.] S.A. Gráficas Mar-Car. Madrid : Fundación REPSOL Publicaciones e Impreso en Gráficas del Mar – Traducido por Gerardo Álvarez Cuervo y equipo de trabajo, 1998. pág. 218. ISBN: 84-923506-0-1 – T.

**Knezevic, Jezdimir. 1996.** *Mantenibilidad.* Madrid : Editorial ISDEFE, 1996. ISBN: 84-89338-08-6.

**Leemis, Lawrence M. 1995.** *Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods.* New Jersey : Prentice Hall, 1995. 9780137205172.

**Lewis, Elmer E. 1987.** *Introduction to Reliability Engineering.* New York : John Wiley & Sons, Inc, 1987. 9780471811992.

**Mehrotra, Kishan, Mohan, Chilukuri K. y Ranka, Sanjay. 1996.** *Elements of Artificial Neural Networks.* s.l. : A Bradford Book, 1996. 978-0262133289.

*Memorias Análisis de Fallas - Especialización en Mantenimiento Industrial, Universidad EAFIT.*  
**Gutiérrez, Juan Ignacio. 2015.** Medellín : s.n., 2015.

**Mendehall, William. 1997.** *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencia.* 13a ed. Mexico : Prentice Hall, 1997, 1997. pág. 744. 0-02380581-1..

**Microsystems@, Leica. 2015.** Leica. [En línea] 20 de 11 de 2015. [Citado el: 20 de 11 de 2015.] <http://www.leica-microsystems.com/products/confocal-microscopes/>.

**Miklos, Tomás y Telo, María Elena. 1997.** *Planeación Prospectiva: Una estrategia para el desarrollo del futuro.* Ciudad de México : Editorial Limusa, 1997. 968-18-3848-3.

**Modarres, Mohammed. 1993.** *What Every Engineer Should Know About Reliability and Risk Analysis.* New York City : Editorial Marcel Dekker, 1993. pág. 351. ISBN: 082478958X.

**Mora, Alberto - Gutiérrez. 2011.** *Mantenimiento - Planeación, Ejecución y Control.* Bogotá : AlfaOmega editores Internacional, 2011. pág. 678. Sexta Edición. ISBN 978-958-682-769-0.

—. **2012.** *Mantenimiento Industrial Efectivo.* 2. Medellín : Coldi, 2012.

**Mora, Luis Alberto - Gutierrez. 2012.** *Mantenimiento Industrial Efectivo.* Envigado : Coldi Ltda, 2012. 978-958-98902-0-2.

**Mora, Luis Alberto. 2009.** *Mantenimiento Planeación, ejecución y control.* Ciudad de México : Alfaomega, 2009. pág. 528. ISBN: 978-958-682-769-0.

**Nachlas, Joel. 1995.** *Fiabilidad.* Madrid : ISDEFE, 1995. ISBN: 84-89338-07-8.

**Navarro, Luis - Elola, Pastor, Ana Clara - Tejedor y Mugaburu, Jaime Miguel - Lacabrera. 1997.** *Gestión integral de mantenimiento.* [ed.] Marcombo Boixareu Editores. Barcelona : Marcombo Boixareu Editores, 1997. pág. 112. ISBN 84-267-1121-9.

**NIND, T.E.W. 2015.** *Etapas Extracción Crudo.* No Especifica, s.l. : 2015.

—. **2015.** *Fundamentos de Producción y Mantenimiento de Pozos Petroleros.* Ontario : Limusa, 2015.

**O'Connor, Patrick D.T. 2002.** *Practical Reliability Engineering.* Cuarta. Stevenage : Wiley - Jhon Wiley & Son, 2002. pág. 540. ISBN: 0-470-84463-9.

**RAE@. 2008.** Real Acedemia Española. *Real Acedemia Española.* [En línea] 2008. [www.rae.es](http://www.rae.es).

**Ramakumar, Ramachandra. 1993.** *Engineering Reliability. Fundamentals and Applications.* New Jersey : Prentice-Hall, 1993. 9780132767590.

**Repuestos@, Criticos. 2006.** Mantenimiento planificado. *Repuestos críticos*. [En línea] 23 de Octubre de 2006. [Citado el: 18 de Enero de 2011.] [www.repuestoscriticos.com.ar](http://www.repuestoscriticos.com.ar).

**Rey, Sacristán Francisco. 1996.** *Hacia la excelencia en Mantenimiento*. [ed.] S.L. Tgp Hoshin. Madrid : Tgp Hoshin, S.L., 1996. pág. 411. ISBN 84-87022-21-9.

**Russel, Stuart J. y Norvig, Peter. 2003.** *Artificial Intelligence. A Modern Approach*. New Jersey : Prentice Hall, 2003. 0131038052.

**Sánchez, Paola y Velásquez, Juan D. 2010.** *Problemas de investigación en la predicción de series de tiempo con redes neuronales artificiales*. Medellín : Avances en Sistemas e Informática, 2010. 16577663.

**VILLAMIZAR, MARIA CRISTINA VILLALBA. 2014.** *ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA VÁLVULA REGULADORA DE CONTRAPRESIÓN BPR PARA EL MANEJO DE GAS EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE POZOS PRODUCTORES CON BOMBEO MECÁNICO DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS*. Bucaramanga : s.n., 2014.

**Warkerly, Dennis, Scheaffer, Richard y Mendenhall, William. 1986.** *Estadística Matemática con Aplicaciones*. Ciudad de México : Grupo Editorial Latinoamericano, 1986. 968-7270-17-9.

**Weatherford. 2015.** *COROD DWR regular-strength continuous rod*. Weatherford, No Especifica : 2015.

**Wikipedia@. 2015.** [En línea] 20 de 11 de 2015. [Citado el: 20 de 11 de 2015.] [https://es.wikipedia.org/wiki/Morfolog%C3%ADa\\_\(biolog%C3%ADa\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Morfolog%C3%ADa_(biolog%C3%ADa)).